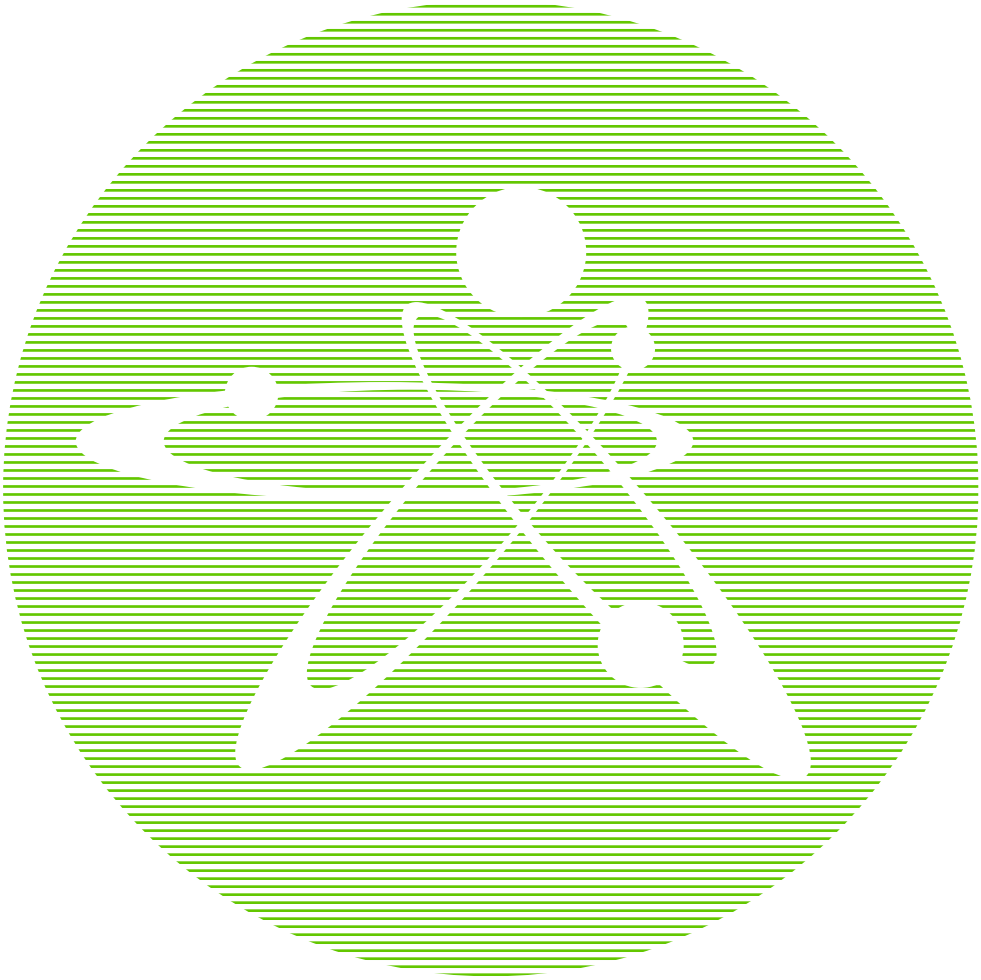
2024
ВЫПУСК 3
ISSN 1729-7516

Вестник НЯЦ РК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН



Вестник НЯЦ РК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 3(99), СЕНТЯБРЬ 2024

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., д.т.н. ВИЕЛЕБА В. (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. КОПНИЧЕВ Ю.Ф. (Россия),
д.ф.-м.н. МИХАЙЛОВА Н.Н., д.ф.-м.н. СОКОЛОВА И.Н., д.ф.-м.н. ТАЖИБАЕВА И.Л.,
Prof. Dr. Yoichi FUJII-E (Япония), PhD Takahiro HAYASHI (Япония)

ҚР ҰЯО Жаршысы

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ
МЕРЗІМДІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛЫ

3(99) ШЫҒАРЫМ, ҚЫРҚҮЙЕК, 2024 ЖЫЛ

NNC RK Bulletin

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

ISSUE 3(99), SEPTEMBER 2024

Журнал «Вестник НЯЦ РК» входит в перечень научных изданий, рекомендуемых Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан для публикации основных результатов научной деятельности.

«ҚР ҰЯО жаршысы» журналы ғылыми қызметтің негізгі нәтижелерін жариялау үшін Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым және жоғары білім саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған ғылыми басылымдар тізбесіне кіреді.

The Journal "NNC RK Bulletin" is included in the list of scientific publications recommended by Committee for Quality Assurance in the Field of Science and Higher Education of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan for the publication of the main results of scientific activities.

СОДЕРЖАНИЕ

NEW RESULTS FOR RADIATIVE P-^{11}B CAPTURE AT LOW ENERGIES
S. K. Sakhiyev, D. M. Zazulin, S. V. Artemov, N. T. Burtebayev, Maulen Nassurlla, D. Alimov, Marzhan Nassurlla, A. Sabidolda, R. Khojayev, Ye. B. Mukanov, D. A. Issayev, S. E. Kemelzhanova, Ya. V. Sidorov, A. Sh. Tursumbekov 5

РАЗРАБОТКА БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И АНАЛИЗА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ
И. А. Бачурина, Н. В. Ларионова, А. В. Топорова 12

ЭКСПРЕСС-МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ФИНАНСОВО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЕКТОВ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ, НА ПРИМЕРЕ НАМЕРЕНИЙ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ АЭС В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН
С. А. Мукенева, Д. Б. Зарва, А. В. Гулькин 21

OBTAINING CELLULOSE WITH CRYSTALLOGRAPHIC ORIENTATION OF MACROMOLECULES FROM THE HUSK OF A HYBRID SUNFLOWER
A. A. Imasheva, S. K. Kabdrakhmanova, K. Akatan, Zh. E. Ibraeva, G. Temirkhanova, M. M. Beisebekov, N. Kantay, A. M. Mausumbaeva 29

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТОЙКОСТЬ К ПИТИНГОВОЙ КОРРОЗИИ ОБЛУЧЕННОЙ НЕЙТРОНАМИ СТАЛИ AISI 316 LN
Д. А. Мережко, А. М. Такиева, М. С. Мережко 35

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПНЕВМОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ НА РЕАКТОРЕ ВВР-К ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ЗОЛОТА В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ
С. Г. Ленник, К. А. Бедельбекова, Е. К. Соколенко 44

РАСЧЕТ НЕЙТРОННЫХ И ГАММА ПОЛЕЙ В НИШЕ ТЕПЛОВОЙ КОЛОННЫ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ВВР-К, РАССМАТРИВАЕМОЙ В КАЧЕСТВЕ МЕСТА РАЗМЕЩЕНИЯ ИСТОЧНИКА УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ
К. Турлыбекулы, А. А. Шаймерденов, Д. С. Сайранбаев, Д. Шапиро, Б. Мухаметулы , О. Баяхметов, С. К. Сахиев 49

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ХАРАКТЕР РАДИАЦИОННОГО РАЗОГРЕВА МАТЕРИАЛОВ В ИМПУЛЬСНОМ ГРАФИТОВОМ РЕАКТОРЕ
Р. Е. Келсингазина, В. А. Витюк, Г. А. Витюк, Н. Е. Мухамедов, С. А. Должиков 56

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МИРОВЫХ И ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЛЕДНИКАХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА
Н. Н. Михайлова, А. С. Мукамбаев, Е. Н. Казаков, В. Г. Морозов, У. А. Игибаев 65

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОАКТИВНЫХ ВЫБРОСОВ АЭС С РАЗНЫМИ ТИПАМИ РЕАКТОРОВ ПРИ ШТАТНОМ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ И ДЛЯ СЦЕНАРИЕВ ПРОЕКТНЫХ И ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЙ
М. К. Мукушева, С. И. Спиридонов, Р. А. Микаилова 74

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ИМПУЛЬСНОГО УСКОРИТЕЛЯ ДУГОВОЙ ПЛАЗМЫ В ВАКУУМЕ
А. У. Амренова, А. М. Жукешов, У. Б. Абдыбай, Ж. М. Молдабеков 83

ВЛИЯНИЕ ВАРЬИРОВАНИЯ РАССТОЯНИЯ НАПЫЛЕНИЯ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И МЕХАНО-ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ 86WC-10Co-4Cr, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ HVOF
Б. К. Рахадилов, Н. Муктанова, Д. Н. Какимжанов 91

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ЖИДКОФАЗНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЛЬФРАМОВЫХ СПЛАВОВ
А. Е. Рысқулов, Б. С. Аманжулов, И. А. Иванов, В. В. Углов, С. В. Злоцкий, А. М. Темир, А. Е. Курахмедов, А. Д. Сапар, Е. О. Унгарбаев, М. В. Колобердин 105

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ВОЛЬФРАМА ПОСЛЕ КАРБИДИЗАЦИИ В ППР
И. А. Соколов, А. Ж. Миниязов, Г. К. Жанболатова, Т. Р. Туленбергенов, Н. М. Мухамедова, А. Ж. Кайырбекова, А. А. Агатанова 115

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕРСИИ МЕТАНА В СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОМ РАЗРЯДЕ
М. К. Скаков, Т. Р. Туленбергенов, И. А. Соколов, А. Ж. Миниязов, А. А. Агатанова 123

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ГРАФИТОВЫХ ТАЙЛОВ ТОКАМАКА КТМ
К. Женис, Б. Ж. Чектыбаев, А. Т. Кусаинов, В. С. Полковников, Д. А. Ольховик 129

ВЛИЯНИЕ МЕРКАПТОПРОПИЛТРИМЕТОКСИСИЛАНА НА ХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ МИКРОТРУБОК ЗОЛОТА В ТРЕКОВЫЕ МЕМБРАНЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИХ В СЕНСОРИКЕ
А. Х. Шакаева, И. В. Корольков, Н. Жуманазар, Д. Т. Нурпеисова, М. В. Здоровец 137

ОЦЕНКА ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК У ПРИРОДНЫХ ПОПУЛЯЦИЙ ЯЩЕРИЦ, ОБИТАЮЩИХ В ЕСТЕСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ НА ТЕХНИЧЕСКИХ ПЛОЩАДКАХ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ПОЛИГОНА
А. В. Паницкий, А. О. Айдарханов, Н. Ж. Кадырова 144

РЕКОГНОСЦИРОВОЧНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ НА ИХ КАЧЕСТВЕННЫЙ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ (с. Бескарагай, область Абай)
А. М. Надеева, А. С. Мамырбаева, А. К. Айдарханова, Н. В. Ларионова, А. О. Айдарханов, Б. Е. Маден 153

Исправление к статье «РАСЧЕТЫ AB-INITIO РОМБОЭДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ $BaTiO_3$ (111), КОМБИНИРОВАННОЙ С ГРАФЕНОВЫМИ ПЛЕНКАМИ»
Б. М. Сатанова, Г. А. Каптагай, А. П. Жаркымбекова, Ф. У. Абуова, А. У. Абуова, Р. Н. Асылбаев, Н. О. Койлык, К. Т. Тугелбаева 160

Исправление к статье «ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ: МЕТОДЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ 2D МАТЕРИАЛОВ»
Г. А. Каптагай, Б. М. Сатанова, Ф. У. Абуова, Н. О. Койлык, А. У. Абуова, С. А. Нуркенов, А. П. Жаркымбекова 161

СПИСОК АВТОРОВ 162

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-5-11
УДК 539.17.01: 539.17.02

NEW RESULTS FOR RADIATIVE P-^{11}B CAPTURE AT LOW ENERGIES

S. K. Sakhiyev[1], D. M. Zazulin[1,2*], S. V. Artemov[1,3], N. T. Burtebayev[1,2], Maulen Nassurlla[1], D. Alimov[1], Marzhan Nassurlla[1], A. Sabidolda[1], R. Khojayev[1,2], Ye. B. Mukanov[1], D. A. Issayev[1,2], S. E. Kemelzhanova[2], Ya. V. Sidorov[2], A. Sh. Tursumbekov[2]

[1] RSE "Institute of Nuclear Physics" ME RK, Almaty, Kazakhstan
[2] Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
[3] Institute of Nuclear Physics, Tashkent, Uzbekistan

** E-mail for contacts: denis_zazulin@mail.ru*

The results of new measurements of the yields of the ^{11}B(p,γ)^{12}C reaction of radiative capture to the ground and first excited states of ^{12}C are presented. By normalizing these results to the corresponding experimental literature data, differential cross sections have been extracted for the angle 0° and for incident proton energies from 482 to 1337 keV. Based on the obtained differential cross sections and using literature data on the angular distributions of the ^{11}B(p,γ)^{12}C reaction in this energy region, the total cross sections and astrophysical S factors of the ^{11}B(p,γ)^{12}C reaction for transitions to the ground and first excited states of ^{12}C have been determined with a statistical error of less than 10%. The experimental data obtained are well described within the framework of a modified potential cluster model with the classification of orbital states according to Young's diagrams and taking into account allowed and forbidden states. Based on the measured experimental cross sections and using the above theoretical model, the rate of this reaction was calculated in the temperature range from 0 to 100 million degrees of Kelvin. Within the limits of error, the results of this work are consistent with the data of earlier works.

Keywords: *nuclear astrophysics, radiative capture, thermonuclear processes, reaction $^{11}B(p,\gamma)^{12}C$, astrophysical S-factor, nuclear reaction rates.*

INTRODUCTION

In nuclear astrophysics and in the field of controlled thermonuclear fusion, the reaction ^{11}B(p,γ)^{12}C is of significant interest [1]. It is one of the main reactions of ^{11}B burning and ^{12}C production in the Sun and stars. The rate of the ^{11}B(p,γ)^{12}C reaction (which took place in the interiors of first-generation stars) may be of great importance for the amount of ^{11}B observed today in the Earth's crust and in the interstellar medium. Material containing boron (80% - ^{11}B) can be used as neutron absorbers in advanced thermonuclear reactors.

To date, the only experimental work (for the energy range $E_{p,\,lab.}$ = 530–3100 keV, where lab. is a laboratory system) in which a full cycle of measurements has been carried out, and in which the differential and total cross sections of the ^{11}B(p,γ)^{12}C reaction are presented for captures to the ground and first excited states of ^{12}C remains the work [2] published in 1965 (in this work, however, errors are not given). Therefore, in this energy region (at $E_{p,\,lab.}$ = 482 – 1337 keV) we carried out new measurements of cross sections and the astrophysical S-factor of the ^{11}B(p,γ)^{12}Creaction of radiative capture to the ground and first excited states of ^{12}C with a statistical error of less than 10%.

RESEARCH METHODS

The experimental part of our work was performed on the electrostatic tandem accelerator UKP-2-1 of the Institute of Nuclear Physics in Almaty [3]. Protons were accelerated to energies $E_{p,\,lab.}$ = 340–1400 keV. Calibration of proton energies in the beam was made with an uncertainties of ±1 keV according to the ^{19}F(p,αγ)^{16}O and ^{27}Al(p,γ)^{28}Si reactions with many well-separated resonances in the region of $E_{p,\,lab.}$ = 340–1400 keV [4, 5].

In our experiments, the specially made reaction chamber [6] with indium vacuum seals, the water-cooled target holder and a quartz glass for obtaining a luminous image of the beam shape in front of the target was used. By an external handle, the quartz glass could be placed in the course of the beam in front of the target for alignment. The γ-ray registration system was realized by using high-pure Germanium (HpGe) γ-detector with a Ge-crystal of volume 111 cm^3. To reduce the room and cosmic ray background the γ-detector was surrounded by 60 mm - thick lead shield. The resolution of the γ-detector was typically 6.5 keV at E_γ<3000 keV.

Energy calibration of the spectrometer at low energies was carried out using the well-known lines of the γ-source ^{56}Co and background lines of 1461 keV (^{40}K) and 2614 keV (RdTh). For energies from 10 MeV to 18 MeV (the operating gamma quanta energy range of this experiment), calibration was carried out using a procedure for determining the position of the peaks (γ_0 and γ_1) from the ^{11}B(p, γ)^{12}C reaction, taking into account the energy of incident protons, target thickness, and reaction energy Q = 15957 keV [7] and the Doppler effect.

Copper plates (~2 mm thick, ~30 mm long, and ~15 mm wide) were used as target backing. The thicknesses of boron films (about 90% of ^{11}B and about 10% of ^{10}B) deposited on two target backings were 100±10 and 145±15 μg/cm^2, respectively. The first target was used for measurements at $E_{p,\,lab.}$ = 500–1100 keV, and the second at $E_{p,\,lab.}$ = 1150–1350 keV.

The detailed description of the reaction chamber and target manufacturing technology can be found in [6, 8, 9].

During the measurements, the γ-detector was at a distance of 11.4 cm from the region where the reaction was localized.

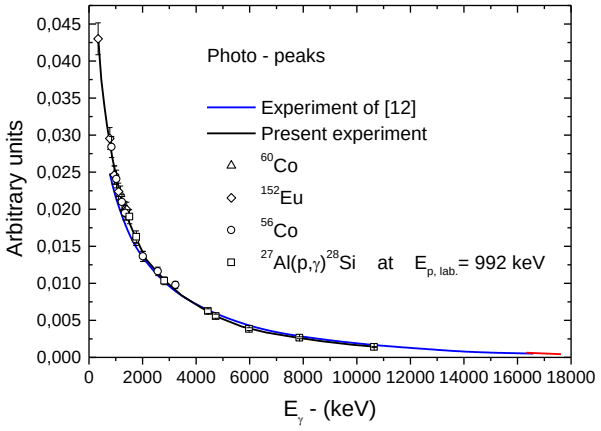
To determine the relative efficiency of the γ-detector in the region of γ-quanta energies from 100 to 3253.6 keV, we used a set of standard gamma sources ^{60}Co, ^{152}Eu and a ^{56}Co source ($T_{1/2}$ = 77 days), the relative intensities of γ lines of which are known with an error of no worse than 4.5% [10]. The relative efficiency of the γ-detector for the energy region from 3253.6 to 10763 keV was determined using the reaction of ^{27}Al(p,γ)^{28}Si at the resonance energy of protons $E_{p, lab.}$ = 992 keV. As a result of this reaction, γ lines are emitted in the energy range of 1.8–10.8 MeV, the relative intensities and angular distributions of which are known with an error of no more than 5% (for the main transitions) [11]. In this work, we used the transitions of the ^{27}Al(p,γ)^{28}Si reaction at $E_{p, lab.}$ = 992 keV with the following energies: 1522, 1779, 2839, 4497.6, 4743, 6020, 7931 and 10763 keV. For the energy range of gamma quanta from 10763 to 16500 keV, we used the efficiency curve of [12] (in which the geometry of the experiment is similar to ours and in which a gamma detector of the same type as ours was used) normalizing it to our curve for energies from 100 to 10763 keV. Further from 16500 to 17500 keV we made a simple linear extrapolation. Figure 1 shows the relative efficiency curves of the gamma detector used in the measurements and for the geometry of our experiment.

The yields of the ^{11}B(p,γ)^{12}C reaction for the transitions to the ground and first excited states were determined at $E_{p, lab.}$ = 500, 750, 800, 1000, 1100, 1150, 1250, 1300 and 1350 keV and at $\theta_{\gamma, lab.}$ = 0°.

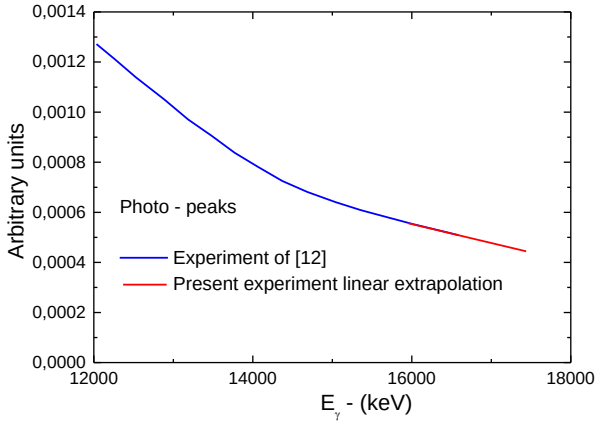
The value of the beam current was ranged from 3 to 8 μA. The energy spread of the beam was determined by the width of the front of ^{27}Al(*p*, γ)^{28}Si reaction yield curve near resonance at $E_{p, lab.}$ = 992 keV (resonance width <0.1 keV) and did not exceed 1.5 keV. The accumulated charges on the target were measured with an uncertainty of 3%. Dead-time effects were kept below 1.5% at all beam energies.

Figure 2 shows the γ-ray spectrum obtained at $E_{p, lab.}$ = 1350 keV and $\theta_{\gamma,lab.}$ = 0°. Figure 2 shows the photo peaks and single and double leakage peaks of the corresponding gamma transitions.

The number of counts in the spectral peak with the preliminarily subtracted background (with the form of a trapezium) divided by the integrator counter and relative efficiency values was taken as the yield of the ^{11}B(p,γ)^{12}C capture reaction. Statistical uncertainties in the determination of the yields (including uncertainties introduced by backgrounds subtracted) were less than 10%.



a) wide energy range



b) high energies

Figure 1. Relative efficiency curves of the HpGe detector. The black curve and open figures are ours, obtained experimentally, the blue curve is from [12], the red curve is linear extrapolation to the required energy region

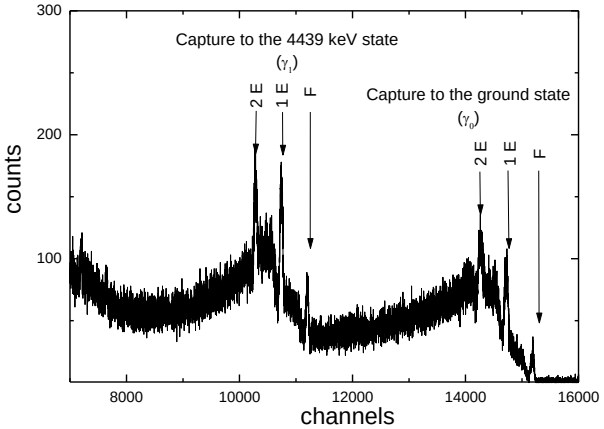


Figure 2. Fragment of the γ-spectrum of ^{11}B(p,γ)^{12}C reaction, obtained at $E_{p, lab.}$ = 1350 keV and $\theta_{\gamma, lab.}$ = 0°. Transitions to the ground and first excited states of ^{12}C are shown. 1 E – single leak peak, 2 E – double leak peak and F – full photo peak. The measurements were carried out with an HpGe detector with a volume of 111 cm^3, which was located at a distance of 11.4 cm from the reaction area

During each measurement, we plotted the number of registered γ-quanta of the transition to the ground and first exited states in ^{12}C (N_γ) on the current indication of the integrator counter (N_p). For each of the energies presented in the work, the dependence of N_γ on N_p represented a straight line within the current statistical uncertainty of determining N_γ, which indicated the stability of the target and the stability of the beam position on it during the whole exposure.

Since in the region of $E_{p,\,lab.}$ = 500–1350 keV the differential cross sections change quite slowly with energy, as can be seen, for example, from previous work [2], the effective laboratory energies were found using the expression $E_{p,\,eff.} = E_{p,\,lab.} - 0.5\Delta_{lab.}(E_{p,\,lab.})$, where $\Delta_{lab.}$ is the energy loss of protons in the target, determined using the LISE++ program [13].

Because the γ-detector energy resolution value and the proton beam energy spread value are significantly less than the energy losses of protons in the target, the upper parts of the $^{11}B(p,\gamma)^{12}C$ reaction γ-lines repeat the courses of the $^{11}B(p,\gamma)^{12}C$ reaction yield curves in the corresponding energy region, and the width of this γ-linesare largely due to the target thickness.This circumstance allowed us to determine the target thickness by analyzing the $^{11}B(p,\gamma)^{12}C$ reactionγ-lines shapes.Moreover, this analysis was one of the methods for monitoring the stability of targets during the experiment.

RESULTS

The differential cross sections for the $^{11}B(p,\gamma)^{12}C$ reaction of radiative capture to the ground and first excited states of ^{12}C for $\theta_\gamma = 0°$ were determined by normalizing the corresponding yields we measured to the differential cross sections of [2]. The results of normalization are presented in Table 1. Using the data on angular distributions from [2] and the differential sections we obtained for the angle 0°, we determined the integral crosssections, which are shown in Figures 3 and 4. From Figures 3 and 4 we can see good agreement between our integral cross sections and the integral cross sections of work [2] both in the form of excitation functions and in the ratio of the intensities of transitions to the ground and first excited states of ^{12}C.

Further according to the formula:

$$S(MeVb) = \sigma(b)E(MeV)exp\left(\frac{4.735}{\sqrt{E(MeV)}}\right),$$

(all quantities in the center of mass system) astrophysical S-factors were calculated, which are presented in Table 2 for the transitions to the ground and first excited states of ^{12}C, respectively. Figure 15 shows the total S-factors for the transitions to the ground and first excited states of ^{12}C together with the data recommended in [14]. From Figures 5 it is clear that, within the limits of statistical errors, our data are in a satisfactory agreement with the result obtained in work [14].

Table 1. Experimental differential cross sections for the $^{11}B(p,\gamma)^{12}C$ reaction. Errors are only statistical

$E_{p.lab.,eff}$, (MeV)	Transition to the ground state of ^{12}C		Transition to the state of 4439 keV of ^{12}C	
	$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ exp.(E,0°), (μb/sr)	Error in (%)	$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ exp.(E,0°), (μb/sr)	Error in (%)
482	0.282±0.028	<10	1.25±0.02	1.9
736.5	0.856±0.057	6.7	2.83±0.05	1.8
787	0.956±0.042	4.4	2.38±0.03	1.4
989	1.38±0.08	5.6	1.36±0.05	3.6
1089.5	1.60±0.04	2.3	1.31±0.03	2.0
1135	1.81±0.04	2.1	1.31±0.03	2.2
1236.5	1.93±0.06	3	1.22±0.04	3.5
1286.5	1.99±0.05	2.3	1.35±0.03	2.3
1337	2.33±0.05	2	1.28±0.03	2.3

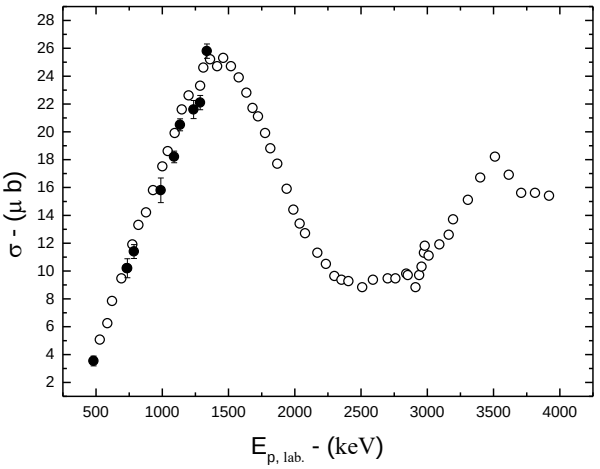


Figure 3. Experimental integral cross sections for the $^{11}B(p,\gamma)^{12}C$ capture reaction to the ground state of ^{12}C nucleus. Filled circles are our result. Open circles are the result of work [2].

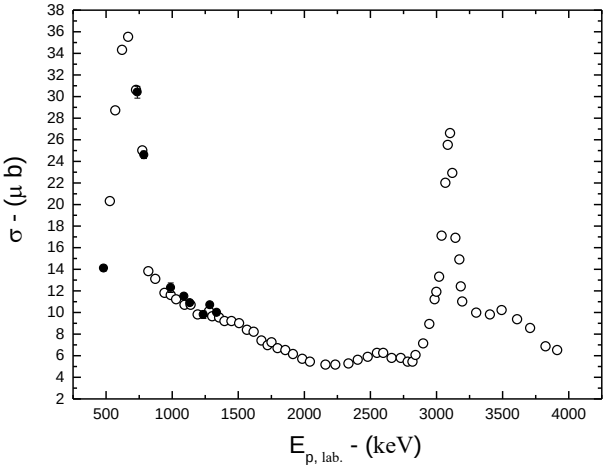


Figure 4. Experimental integral cross sections for the $^{11}B(p,\gamma)^{12}C$ capture reaction to the 4439 keV state of ^{12}C nucleus. Filled circles are our result. Open circles are the result of work [2]

Table 2. Experimental astrophysical S-factors for the $^{11}B(p,\gamma)^{12}C$ reaction. Errors are only statistical

$E_{p.c.m.,eff}$, (MeV)	Transition to the ground state of ^{12}C		Transition to the state of 4439 keV of ^{12}C	
	$S^{exp.}(E)$, (MeV b)	Error in (%)	$S^{exp.}(E)$, (MeV b)	Error in (%)
0.442	0.00194±0.00019	< 10	0.00773±0.00015	1.9
0.675	0.00219±0.00015	6.7	0.00653±0.00012	1.8
0.721	0.00217±0.00009	4.4	0.00468±0.00007	1.4
0.907	0.00207±0.00012	5.6	0.00161±0.00006	3.6
0.999	0.00208±0.00005	2.3	0.0013±0.00003	2.0
1.040	0.00222±0.00005	2.1	0.00118±0.00003	2.2
1.133	0.00209±0.00006	3	0.000949±0.000033	3.5
1.179	0.00204±0.00005	2.3	0.000978±0.000023	2.3
1.226	0.00228±0.00004	2	0.000883±0.00002	2.3

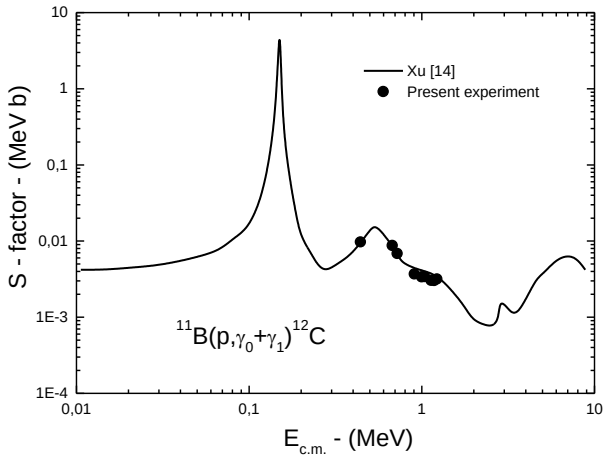


Figure 5. S-factors for the capture process $^{11}B(p,\gamma_0+\gamma_1)^{12}C$. The statistical errors are smaller than the sizes of the represented points

COMPARISON WITH CALCULATION

The integral cross sections for the $^{11}B(p,\gamma_0)^{12}C$ reaction obtained in this work were compared (see Figure 6) with calculations for this process at energies less than 1500 keV, performed in [15] within the framework of a modified potential cluster model with the classification of orbital states according to Young diagrams and taking into account allowed and forbidden states [16–19]. From Figure 6 we can see a good agreement between the calculated data of [15] and our experimental results and the experimental results of works [2, 20–22] obtained in the region from 80 keV to 1500 keV in a laboratory system. Also, calculations [15] correctly express the position of the first resonance. This means that it is quite possible to use the calculation results to extrapolate cross sections to the low-energy region and carry out various astrophysical calculations with them, in particular, to calculate the rate of the thermonuclear reaction of $^{11}B(p,\gamma_0)^{12}C$ occurring in stars in the CNO cycle.

Moreover, a comprehensive, experimental and theoretical (within the framework of a modified potential cluster model) study of the reaction $^{11}B(p,\gamma_0)^{12}C$ made it possible to determine important nuclear characteristics of the proton and ^{11}B system at low energies and for different orbital channels:

1) The process of proton capture in the reaction $^{11}B(p,\gamma_0)^{12}C$ is completely determined by the non-resonant E1-transition of $^3S_1 \rightarrow {}^3P_0$ and the resonant E2-transition of $^3P_2 \rightarrow {}^3P_0$.

2) All nuclear potentials have a Gaussian form of $V(r) = -V_0\exp(-\alpha r^2)$ (there is also Coulomb interaction);

3) For the potential of a resonant $^{3+5}P_2$-wave with a forbidden state and $J = 2^+V_0 = 24.38058$ MeV, $\alpha = 0.025$ fm^{-2};

4) For the potentials of non-resonant $^3P_0$- and $^{3+5}P_1$-scattering waves with forbidden states $V_0 = 60.0$ MeV, $\alpha = 0.1$ fm^{-2};

5) For the potential of a resonant $^5S_2$ wave without a forbidden state with $J = 2^-V_0 = 10.9256$ MeV, $\alpha = 0.08$ fm^{-2};

6) For the $^3P_0$ potential of the ground state of ^{12}C nucleus with a forbidden state in the p + ^{11}B cluster channel $V_0 = 142.21387$ MeV, $\alpha = 0.1$ fm^{-2}.

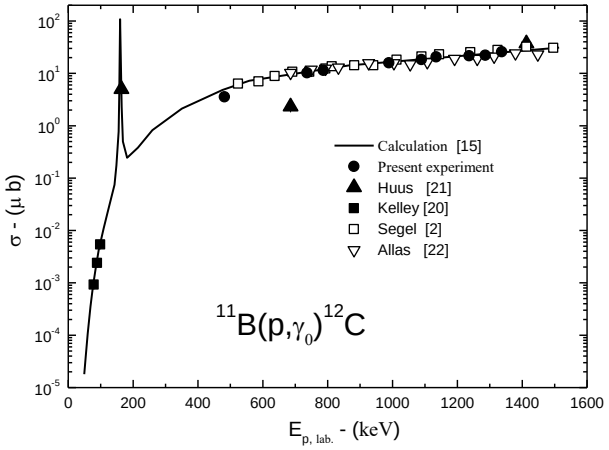


Figure 6. Integral cross sections for the radiative reaction of p + ^{11}B capture to the ground state of the ^{12}C nucleus in the energy region less than 1500 keV. Experimental errors are smaller than the sizes of the presented points

$^{11}B(p,\Gamma_0)^{12}C$ REACTION RATE

The measured cross sections for the radiative capture reaction, as well as the data from [15], were used for calculating the rate of $^{11}B(p,\gamma_0)^{12}C$reaction in the stars interior as a function of stellar temperature T_6, where $T_6 = T \cdot 10^6$ K. The Maxwellian-averaged reaction rates $N_A\langle\sigma v\rangle$ as a function of temperature are defined by

$$N_A\langle\sigma\nu\rangle = N_A\left(\frac{8}{\pi\mu}\right)^{1/2}\left(k_BT\right)^{-3/2}\int_0^\infty \sigma(E)\exp(-E/k_BT)EdE,$$

where N_A is the Avogadro's number, k_B is the Boltzmann constant, and $\nu = \sqrt{2E/\mu}$ is the relative velocity of the colliding particles. In Figure 7 we present the reaction rates of our calculation and its comparison with the data of [23]. It is seen that the result of our calculation is in good agreement with that recommended in [23] for a fairly wide temperature range (from 0 to 100 million degrees of Kelvin).

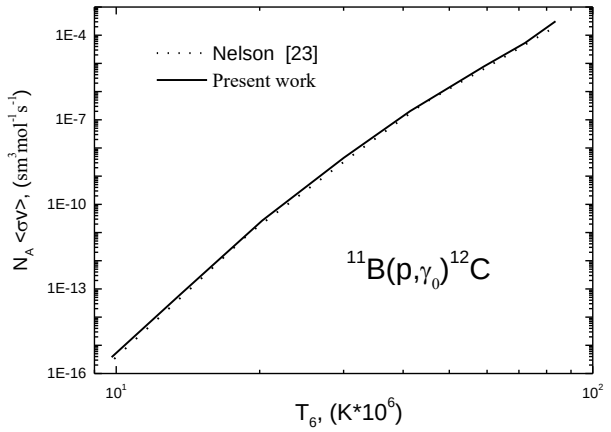


Figure 7. Rate for the radiative reaction of p + ^{11}B capture to the ground state of the ^{12}C nucleus.

DISCUSSION

In this work, with a statistical error of less than 10% at nine energies from 482 to 1337 keV in a laboratory system, new experimental data on differential (for angle 0^0) and integral cross sections, as well as on astrophysical S - factors of the reaction of^{11}B(p,γ)^{12}C for transitions to the ground and first excited states of ^{12}C were obtained. The experimental results presented in this work are in good agreement with the literature data.

The work shows that the measured cross sections in the corresponding energy region are well described within the framework of a modified potential cluster model in which nuclear potentials are consistent with the spectrum of resonance levels and contain forbidden states in some partial waves, and the potential of the ground state is consistent (in general) with the main characteristics of the nucleus ^{12}C in the p + ^{11}B channel, including binding energy and charge radius.

The rate of the radiative capture reaction ^{11}B(p,γ$_0$)^{12}C, which is consistent with previously performed calculations at temperatures up to $T_6 \simeq 100$ have been also calculated in this work.

Acknowledgments

This work is funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant# AP14870964 "Studies of the interaction of protons and ions ^{10}B with nuclei ^{11}B for thermonuclear and astrophysical applications").

The authors express gratitude to all employees of the operation service of the electrostatic tandem accelerator UKP-2-1 at the Institute of Nuclear Physics of the Republic of Kazakhstan for the stable operation of the accelerator.

REFERENCES

1. C.A. Barnes, D.D. Clayton, and D.N. Schramm. Essays in nuclear astrophysics. Presented to William A. Fowler, on the occasion of his seventieth birthday, (Cambridge University Press, Cambridge), 562 P. (1982); S.B. Dubovichenko. Thermonuclear processes in Stars and Universe. Second English Edition, revised and expanded, (Saarbrucken, Germany, Scholar's Press), 332 P. (2015); D.D. Clayton. Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis, (University of Chicago Press, Chicago), 634 P. (1983); D.N. Schramm and R. Wagoner, Annu. Rev. Nucl. Sci. 27, 37 (1977).
2. R.E. Segel, S.S. Hanna, R.G. Allas // Phys. Rev. – Vol. 139. – P. B818–B830 (1965).
3. A.A. Arzumanov, Proceedings of the 13th particle accelerator conference. Dubna, Russia, October 13-15, 1, 118 (1992).
4. J.W. Butler // U.S. Naval Research Laboratory, NRL Report, 5282 (1959).
5. P.B. Lyons, J.W. Toevs and D.G. Sargood // Nucl. Phys. A130, 1 (1969).
6. N. Burtebaev, S.B. Igamov, R.J. Peterson, R. Yarmukhamedov and D.M. Zazulin // Phys. Rev. C78. – P. 035802. (2008).
7. J.H. Kelley, J.E. Purcell, C.G. Sheu. Energy levels of light nuclei A = 12. Nuclear Physics A968, 71-253 (2017).
8. S.B. Dubovichenko, N. Burtebaev, D.M. Zazulin, Zh.K. Kerimkulov and A.S.A. Amar // Phys. Atom. Nucl.. – Vol. 74. – P. 984. (2011).
9. Sergey Dubovichenko, Nassurlla Burtebayev, Albert Dzhazairov-Kakhramanov, Denis Zazulin, Zhambul Kerimkulov, Marzhan Nassurlla, Chingis Omarov, Alesya Tkachenko, Tatyana Shmygaleva, Stanislaw Kliczewski, Turlan Sadykov // Chinese Physics C41. – P. 014001. (2017).
10. P.H. Barker and R.D. Connor // Nucl. Inst. And Meth. – Vol. 57. – P. 147 (1967).
11. A. Anttila, J. Keinonen, M. Hautala, I. Forsblom. Use of the 27Al(p,γ)28Si, Ep = 992 keV resonance as a gamma-ray intensity standard // Nucl. Instr. Meth. – Vol.147. – P. 501–505. (1977).
12. J.J. He et.al. Direct measurement of ^{11}B(p,γ)^{12}C astrophysical S-factor at low energies // Physical Review C – V. 93. 5. – P. 055804. (2016).
13. http://lise.nscl.msu.edu/lise.html
14. Y. Xu, K. Takahashi, S. Goriely, M. Arnould, M. Ohta, H. Utsunomiya. NACRE II: an update of the NACRE compilation of charged-particle-induced thermonuclear reaction rates for nuclei with mass number A < 16 // Nucl. Phys. A. – V. 918. – P.61–169. (2013).
15. S.B. Dubovichenko Astrophysical proton capture by ^{11}B nucleus // Russian Physics Journal. – V. 58 1. – P. 17–25. (2015).
16. V.G. Neudatchin, V.I. Kukulin, V.N. Pomerantsev, A.A. Sakharuk Generalized potential model description of mutual scattering of the lightest p+d, d+^{3}He nuclei and the corresponding photonuclear reactions // Physical Review C. – V. 45. – P. 1512–1527. (1992).
17. S.B. Dubovichenko, A.V. Dzhazairov-Kakhramanov, N.A. Burkova Neutron radiative capture by ^{2}H, ^{6}Li, ^{7}Li, ^{12}C and ^{13}C at astrophysical energies // International Journal of Modern Physics E. – V. 22. – No. 5. – P. 1350028-1–1350028-52. (2013).
18. S.B. Dubovichenko, A.S. Tkachenko, R.Ya. Kezerashvili, N.A. Burkova, and A.V. Dzhazairov-Kakhramanov. ^{6}Li(p,γ)^{7}Be reaction rate in the light of the new data of the Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics // Physical Review C. – V. 105. – P. 065806. (2022).
19. S.B. Dubovichenko, N.A.Burkova, A.S.Tkachenko, A.V.Dzhazairov-Kakhramanov. Influence of resonances

on the $^{11}B(n,\gamma)^{12}B$ reaction rate. Capture at excited states of 12B // International Journal of Modern Physics E – V. 32. – No. 2. – P. 2350008-1–2350008-39. (2023).
20. J.H. Kelley, R.S. Canon, S.J. Gaff, R.M. Prior, B.J. Rice, E.C. Schreiber, M. Spraker, D.R. Tilley, E.A. Wulf, and H.R. Weller The $^{11}B(p,\gamma)^{12}C$ reaction below 100 keV // Physical Review C. – V. 62. – P. 025803-1–025803-1. (2000).
21. T. Huus, R.B. Day. The gamma radiation from ^{11}B bombarded by protons // Physical Review. – V. 91. –P. 599–605. (1953).
22. R.G. Allas, S.S. Hanna, Luise Meyer-Schützmeister, R.E. Segel. Radiative capture of protons by ^{11}B and the giant dipole resonance in ^{12}C // Nuclear Physics. – V. 58. – P. 122–144. (1964).
23. S.O. Nelson, E.A. Wulf, J.H. Kelley, H.R. Weller Evaluations of thermonuclear proton capture reaction rates for ^{2}H, ^{7}Li, ^{9}Be, and ^{11}B // Nuclear Physics A. – V. 679. – P. 199–211. (2000).

ТӨМЕНЭНЕРГИЯЛАРДАРАДИАЦИЯЛЫҚ Р-^{11}В ТҮСІРУҮШІНЖАҢАНӘТИЖЕЛЕР

С. К. Сахиев[1], Д. М. Зазулин[1,2*], С. В. Артемов[1,3], Н. Т. Буртебаев[1,2], Маулен Насурлла[1], Д. Алимов[1], Маржан Насурлла[1], А. Сабидолда[1], Р. Ходжаев[1,2], Е. Б. Муканов[1], Д. А. Исаев[1,2], С. Е. Кемелжанова[2], Я. В. Сидоров[2], А. Ш. Турсумбеков[2]

[1] ҚР ЭМ «Ядролық физика институты» РМК, Алматы, Қазақстан
[2] Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан
[3] Ядролық физика институты, Ташкент, Өзбекстан

** Байланыс үшін E-mail: denis_zazulin@mail.ru*

$^{11}B(p,\gamma)^{12}C$ радиациялық қармау реакциясының негізгі және ^{12}C бірінші қоздырылған күйлеріне жаңа өлшемдердің нәтижелері берілген. Осы нәтижелерді сәйкес тәжірибелік әдебиет деректеріне қалыпқа келтіру арқылы 0° бұрышы және 482-ден 1337 кэВ дейінгі үдетілген протон энергиялары үшін дифференциалдық қималар алынды. Өлшенген ддифференциалдық қималар негізінде және осы энергетикалық аймақтағы $^{11}B(p,\gamma)^{12}C$ реакциясының бұрыштық таралулары туралы әдебиет деректерін пайдалана отырып, $^{11}B(p,\gamma)^{12}C$ радиациалық қармау реакциясының жалпы көлденең қималары мен астрофизикалық S факторлары ^{12}C негізгі және бірінші қозған күйі (барлық алынған мәндердің статистикалық қателері 10%-дан аз) үшін алынды. Алынған тәжірибелік деректер Янг схемалары бойынша орбиталық күйлердің жіктелуі мен және рұқсат етілген және тыйым салынған күйлерді ескере отырып, модификацияланған потенциалды кластерлік модель шеңберінде жақсы сипатталған. Өлшенген тәжірибелік көлденең қималар негізінде және жоғарыда келтірілген теориялық модельді пайдалана отырып, бұл реакция жылдамдығы 0-ден 100 миллион градус Кельвинге дейінгі температура диапазонында есептелді. Қателік шегінде бұл жұмыстың нәтижелері бұрынғы жұмыстардың деректерімен сәйкес келеді.

Түйін сөздер: *ядролық астрофизика, радиациялық қармау, термоядролық процестер, $^{11}B(p,\gamma)^{12}C$ реакциясы, астрофизикалық S-фактор, ядролық реакция жылдамдығы.*

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ РАДИАЦИОННОГО Р-^{11}В ЗАХВАТА ПРИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ

С. К. Сахиев[1], Д. М. Зазулин[1,2*], С. В. Артемов[1,3], Н. Т. Буртебаев[1,2], Маулен Насурлла[1], Д. Алимов[1], Маржан Насурлла[1], А. Сабидолда[1], Р. Ходжаев[1,2], Е. Б. Муканов[1], Д. А. Исаев[1,2], С. Е. Кемелжанова[2], Я. В. Сидоров[2], А. Ш. Турсумбеков[2]

[1] РГП «Институт ядерной физики» МЭ РК, Алматы, Казахстан
[2] Казахский Национальный Университет имени Аль-Фараби, Алматы, Казахстан
[3] Институт ядерной физики, Ташкент, Узбекистан

** E-mail для контактов: denis_zazulin@mail.ru*

Представлены результаты новых измерений выходов реакции $^{11}B(p,\gamma)^{12}C$ радиационного захвата на основное и первое возбужденные состояния ^{12}C. Нормированием этих результатов на соответствующие экспериментальные литературные данные извлечены дифференциальные сечения для угла 0° и при энергиях налетающих протонов от 482 до 1337 кэВ. На основе полученных дифференциальных сечений и с использованием литературных данных по угловым распределениям реакции $^{11}B(p,\gamma)^{12}C$ в этой области энергий со статистической погрешностью менее 10% определены полные сечения и астрофизические S-факторы реакции $^{11}B(p,\gamma)^{12}C$ для переходов на основное и первое возбужденные состояния ^{12}C. Полученные экспериментальные данные хорошо описываются в рамках модифицированной потенциальной кластерной модели с классификацией орбитальных состояний по схемам Юнга и с учетом разрешенных и запрещенных состояний. На основе измеренных экспериментальных сечений и с помощью вышеприведенной теоретической модели рассчитана скорость этой реакции в области температур от 0 до 100 млн градусов Кельвина. В пределах погрешностей результаты настоящей работы согласуются с данными более ранних работ.

Ключевые слова: *ядерная астрофизика, радиационный захват, термоядерные процессы, реакция $^{11}B(p,\gamma)^{12}C$, астрофизический S-фактор, скорости ядерных реакций.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-12-20
УДК 004.4: 004.6

РАЗРАБОТКА БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И АНАЛИЗА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

И. А. Бачурина*, Н. В. Ларионова, А. В. Топорова

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

** E-mail для контактов: bachurina@nnc.kz*

В статье рассмотрены ключевые функциональные требования к базе данных (БД) для эффективного хранения, организации и анализа научных публикаций. На основе анализа материалов за 30-летний период научной деятельности Института радиационной безопасности и экологии, а также учитывая интересы пользователей, были определены требования к функциональности и структуре БД. В результате была спроектирована и разработана БД с использованием средств и технологий, обеспечивающих взаимодействие пользователя и сервера. Созданный пользовательский интерфейс предоставляет удобные средства для работы с данными. Определено, что БД является эффективным инструментом для анализа данных, поскольку обладает спектром функций, позволяющих проводить разнообразные виды анализа: возможность выборки данных в соответствии с заданными критериями, их сортировка по различным параметрам и извлечение для последующего анализа.

Ключевые слова: *база данных, публикации, статьи, клиент-серверное приложение, пользовательский интерфейс.*

Введение

Обмен научной информацией, идеями, полученными экспериментальными данными, является важной составляющей науки и играет ключевую роль в ее развитии. Различные формы публикаций, такие как отчеты, монографии, тезисы, сборники трудов служат главными средствами распространения результатов исследований. Обязательным условием для ведения научной деятельности является опубликование статей, цель которых заключается в оперативном информировании общественности о полученных результатах.

Институт радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ РК активно внедряется в научные процессы, принимая участие в государственных программах и проводя исследования в области радиационной безопасности и экологии. За 30 лет своего существования Институт накопил обширный объем научных материалов, содержащих важные данные и результаты исследований. Филиал и сегодня задействован во многих научных программах, одной из которых является программа BR21882086 «Разработка устойчивого управления земельными ресурсами и водными объектами на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона». В рамках данной программы запланировано проведение семинаров и тренингов по популяризации мер радиационной и экологической безопасности и внедрению научных результатов программы.

Для популяризации результатов научной деятельности Института встал вопрос о создании инструмента, который бы обеспечивал управление, хранение и доступ к научным материалам. Данный ресурс должен обеспечивать многопользовательский доступ, поиск и анализ информации, что позволило бы более качественно использовать научный потенциал Института и способствовать дальнейшему развитию области радиационной безопасности и экологии. Таким средством могут выступать базы данных – структурированные коллекции данных, организованные и доступные для использования любым пользователем [1], важным аспектом которых является возможность поиска нужной информации.

Существует большое количество БД, содержащих информацию по разным предметным областям, для всех них поиск информации осуществляется с помощью:

- использования метаданных для классификации и систематизации научного материала. Это могут быть названия публикаций, ФИО авторов, ключевые слова, аннотации и т.д.
- поисковых алгоритмов, учитывающих не только прямое соответствие данных запросу, но и семантические аспекты запроса. Поисковые алгоритмы также позволяют осуществлять поиск по всему тексту статьи.
- элементов машинного обучения с возможностью предоставления рекомендаций по похожим публикациям и исследованиям. Алгоритмы анализируют поведение пользователей и их предпочтения для предложения наиболее подходящих материалов.
- фильтрации и сортировки данных по различным параметрам. Чаще всего это дата опубликования, журнал, предметная область, организация и т.п.
- интеграции с другими БД. Например, возможность просмотра публикаций на платформе ORCID через профиль в БД Scopus, используя ORCID-идентификатор (уникальный числовой идентификатор исследователя).

Рассмотрим некоторые известные БД. PubMed – крупнейшая база медицинских научных публикаций, включающая статьи из различных областей медицины и биомедицинских исследований (https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/) [2]. PubMed использует

расширенные функции поиска, такие как Medical Subject Headings. MeSH – это словарь, используемый для индексирования статей, MeSH термины позволяют пользователям более точно находить релевантные статьи. БД IEEE Xplore – содержит более 5 000 000 публикаций, отчетов и стандартов в области электротехники, компьютерных наук и связи (https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp) [3]. IEEE Xplore предоставляет возможности для поиска по конкретным областям инженерии и технологий, с фильтрацией по типу публикации, автору, дате опубликования и другим критериям. БД Scopus – мультидисциплинарная база данных, предоставляющая информацию о научных публикациях, статьях, книгах и конференциях в различных областях знаний, (https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic#basic) [4]. Отличительной чертой Scopus является поддержка анализа цитирования, а также использование индекса Хирша, как оценки «научной продуктивности» ученых.

МАТЕРИАЛЫ И СРЕДСТВА

Объектом исследования работы является научный материал, включающий статьи, тезисы (материалы конференций), монографии, авторефераты, сборники трудов, буклеты и отчеты о научно-исследовательской работе, созданные в рамках деятельности Института радиационной безопасности и экологии за весь период его существования. Этот материал содержит результаты исследований в области радиационной безопасности и экологии. На данный момент проанализировано и занесено в БД более 860 источников.

Создание БД включает в себя несколько этапов:

- определение основных функций и возможностей инструмента разработки;
- проектирование и разработка БД (создание структуры БД, определение таблиц, полей и связей между ними, а также разработка пользовательского интерфейса для ввода, редактирования и поиска данных);
- наполнение БД научным материалом и проведение анализа с помощью инструментов, имеющихся в разработанной БД.

В качестве основных требований к БД определены следующие:

- *Хранение данных:* обеспечение возможности сохранения различных типов научных публикаций, таких как статьи, тезисы, монографии и др.
- *Организация и структурирование данных:* создание системы организации данных, позволяющей классифицировать информацию по различным критериям, таким как автор, название, ключевые слова, дата публикации и другие параметры.
- *Поиск и фильтрация данных:* разработка возможностей для эффективного поиска и фильтрации информации среди хранимых данных с целью быстрого доступа к необходимым публикациям.
- *Управление доступом:* обеспечение безопасного доступа к данным и возможность управления правами доступа для различных пользователей в соответствии с их ролями и функциями.
- *Анализ данных:* предоставление инструментов для анализа собранных данных с целью выявления закономерностей, тенденций и вклада различных факторов в область радиационной безопасности и экологии (сортировка, выборка).
- *Интерфейс пользователя:* разработка интуитивно понятного пользовательского интерфейса, который будет удобен для использования и позволит пользователям легко взаимодействовать с инструментом.

На основе анализа научного материала в виде статей, материалов конференций, материалов издательской деятельности и отчетов, семантическая модель разрабатываемой БД включает следующие основные сущности:

- *Публикации (publics):* информация о научных публикациях, включая заголовок, тип документа, название журнала, дату создания, библиографические записи и связи с категориями и авторами.
- *Авторы (authors):* данные об авторах публикаций, включая их полное имя, место работы и индекс Хирша.
- *Категории (categories):* описание категорий научных публикаций.
- *Пользователи (users):* информация о пользователях системы, включая администраторов и обычных пользователей.
- *Связи между публикациями и авторами (public_authors):* связи между публикациями и их авторами для учета нескольких авторов публикации.

Определены функции для работы с этими данными через пользовательский интерфейс. Их можно разделить на три основные категории.

1) Функции доступа к данным:

- *selectAll($table, $params = [])*: возвращает все записи из указанной таблицы с возможностью задания дополнительных параметров.
- *selectOne($table, $params = [])*: возвращает одну конкретную запись из таблицы с учетом заданных параметров.
- *selectWithPaginationAndSorting ($table, $params, $perPage, $offset, $sortBy, $sortOrder)*: позволяет получать данные с учетом пагинации и сортировки.

2) Функции модификации данных:

- *insert($table, $params)*: добавляет новые записи в указанную таблицу базы данных.
- *update($table, $id, $params)*: редактирует существующие записи в таблице на основе указанного идентификатора.
- *delete($table, $params)*: удаляет записи из таблицы в соответствии с указанными параметрами.

− *deleteAuthors($table, $id)*: удаляет записи авторов из таблицы на основе указанного идентификатора.

3) Функции отладки и проверки:

− *checkDatabaseError($query)*: проверяет наличие ошибок при выполнении запроса к базе данных.

− *testView($value)*: отображает содержимое переменной в процессе отладки и анализа данных.

− *logError($message)*: регистрирует сообщения об ошибках и событиях для последующего анализа.

В качестве инструментов анализа, имеющихся в БД, выступают функции, позволяющие выполнить выборку по категориям публикаций, авторам, типам материала, годам: getAllCategories() – получение списка всех категорий, которые затем могут быть использованы для классификации научных публикаций; getPublicationsByCategory($categoryId) – позволяет получить все публикации в заданной категории; getPublicationsByType($type) – возвращает все публикации определенного типа; selectTopTypes() – позволяет выявить наиболее часто встречающиеся типы материалов; getAllCategoriesWithPublications Count() – возвращает список всех категорий с указанием количества публикаций в каждой из них; getPublicationsByAuthor($authorId) – возвращает все публикации по указанному идентификатору автора и т.д. Данные функции осуществляют сортировку и выборку данных, на основе которых можно выполнить анализ данных и выявить тренды и выполнить оценку влияния различных факторов на радиационную безопасность и экологию.

При проектировании и разработке БД для хранения и систематизации научных публикаций были использованы следующие технологии:

− *MySQL:* MySQL был выбран в качестве системы управления реляционными базами данных (СУБД) благодаря своей надежности, производительности и распространенности. Он предоставляет широкие возможности для создания, изменения и запросов данных, а также обладает хорошей поддержкой и активным сообществом разработчиков.

− *PHP (Hypertext Preprocessor):* PHP использовался для создания динамических веб-приложений и взаимодействия с базой данных MySQL. PHP позволяет выполнять различные операции с данными, обрабатывать запросы пользователя и генерировать динамический контент на основе полученных данных из базы данных.

− *HTML (HyperText Markup Language) и CSS (Cascading Style Sheets):* HTML и CSS применялись для создания пользовательского интерфейса и визуального оформления веб-приложения. HTML определяет структуру контента страницы, а CSS – ее внешний вид, что позволяет создавать привлекательные и удобные для использования интерфейсы.

− *JavaScript:* JavaScript использовался для добавления интерактивности и динамического поведения на веб-страницах, что улучшает пользовательский опыт. Он позволяет обрабатывать события пользователя, выполнять асинхронные запросы к серверу, создавать анимацию и многое другое.

Для разработки БД использовались такие программные средства, как AMPPS Version 4.3, Visual Studio Code Version 1.78.2, Google Chrome. Разработанная БД – это клиент-серверное приложение. AMPPS обеспечивал локальную серверную среду, включая Apache, MySQL, PHP, Perl и Python, позволяя создавать и тестировать веб-приложения локально. Visual Studio Code предоставлял интуитивно понятную среду разработки с множеством интегрированных инструментов и возможностей для написания и отладки кода.

AMPPS (Apache, MySQL, PHP, Perl, Python) – это мощный и удобный инструмент для разработки веб-приложений, который позволяет создавать локальные серверные среды на персональных компьютерах. Он включает в себя все необходимые компоненты для запуска веб-сервера и базы данных на компьютере, в том числе Apache, MySQL, PHP, Perl и Python. Это означает, что возможно создавать и тестировать веб-приложения локально, прежде чем загружать их на удаленный сервер. [5].

Visual Studio Code (VS Code) – это инновационный текстовый редактор, разработанный Microsoft, который предоставляет разработчикам широкий спектр возможностей для создания высококачественного программного обеспечения. VS Code предлагает удобную и интуитивно понятную среду разработки. Редактор обладает множеством интегрированных инструментов, таких как подсветка синтаксиса, автоматическое завершение кода, отладчик, управление Git и многое другое. Одной из особенностей VS Code является его высокая степень настраиваемости и расширяемости благодаря большому количеству доступных расширений из магазина расширений. [6].

Google Chrome – веб-браузер, который предоставляет разработчикам инструменты для анализа, отладки и оптимизации веб-приложений. Включенные в него инструменты разработчика, такие как DevTools, позволяют анализировать HTML, CSS и JavaScript в реальном времени, отслеживать сетевые запросы, отлаживать JavaScript-код и аудитировать веб-страницы на производительность, доступность и SEO-оптимизацию. Кроме того, Google Chrome предоставляет возможность эмулировать различные устройства и разрешения экрана, что позволяет создавать адаптивные и отзывчивые веб-страницы.

В таблице 1 представлены основные характеристики средств, используемых для разработки БД научных публикаций.

Таблица 1. Основные характеристики средств разработки

Программный продукт	AMPPS	Visual Studio Code	Google Chrome
Тип	Локальная серверная среда	Интегрированная среда разработки (IDE)	Веб-браузер
Поддерживаемые языки	PHP, Perl, Python, MySQL и другие	JavaScript, TypeScript, HTML, CSS и многие другие	HTML, CSS, JavaScript и другие веб-технологии
Операционные системы	Windows, macOS, Linux	Windows, macOS, Linux	Windows, macOS, Linux, Android, iOS
Отладка	Поддержка отладки PHP-приложений	Встроенные инструменты отладки для различных языков программирования	Возможность отладки веб-страниц и веб-приложений
Расширяемость	Возможность установки дополнительных модулей и компонентов	Огромное количество плагинов и расширений для настройки среды разработки	Магазин Chrome Web Store для установки дополнений и расширений
Управление версиями	Отсутствует	Интеграция с системами контроля версий, такими как Git	—

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных работ, определены следующие требования к БД:

− возможность аутентификации и авторизации пользователя (для пользователя-администратора);

− быстрый поиск материалов по автору и/или названию (ключевым словам) публикации;

− отображение статистического материала: разбивка по категориям, типам материала, авторам;

− отображение последних публикаций в порядке убывания даты их публикации;

− выборка публикаций по типу научного материала за определенный год или за все годы;

− возможность просмотра списка всех публикаций для отдельного автора;

− возможность извлечения библиографической записи для каждой публикации, позволяющая получить стандартизированную информацию о документе;

− для администратора возможность редактирования и удаления записей (новые категории, авторы, публикации).

Для эффективного хранения больших объемов данных была разработана корректная структуры БД и определены ее функции и возможности. Таким образом, логическая модель БД выглядит следующим образом.

Таблица **publics:** в этой таблице хранится информация о научных публикациях. Она содержит уникальный идентификатор *Id*, который является первичным ключом (PRIMARY KEY). Также в таблице есть внешний ключ *Id_category*, который связывает публикации с категориями из таблицы **categories**.

Id (INT, PK): уникальный идентификатор публикации.

Title (VARCHAR): заголовок публикации.

DOC (VARCHAR): имя файла документа.

Type (VARCHAR): тип документа (статья, тезисы, монография и т.д.).

Journal_title (VARCHAR): название журнала.

Created_date (DATE): дата опубликования / создания научного материала.

Bibl_rec_2017 (TEXT): библиографическая запись в формате ГОСТ от 2017 года.

Bibl_rec_2003 (TEXT): библиографическая запись в формате ГОСТ от 2003 года.

Id_category (INT, FK): внешний ключ, связывающий с таблицей categories, указывает на категорию публикации.

Id_user (INT, FK): внешний ключ, связывающий с таблицей users, указывает на пользователя, который создал публикацию.

Таблица **authors:** здесь хранится информация об авторах научных публикаций. Таблица имеет уникальный идентификатор *Id* в качестве первичного ключа. Кроме того, здесь используется индекс PRIMARY KEY, который обеспечивает уникальность значений поля *Id*.

Id (INT, PK): уникальный идентификатор автора.

Fullname (VARCHAR): полное имя автора.

Job_position (VARCHAR): организация, в которой работает сотрудник.

HIRSH (TINYINT): индекс Хирша автора.

Таблица **categories:** содержит информацию о категориях научных публикаций. Каждая категория имеет уникальный идентификатор *Id*, который является первичным ключом. Также в таблице есть индекс *Name*, который обеспечивает быстрый доступ к категориям по их названиям.

Id (INT, PK): уникальный идентификатор категории.

Name (VARCHAR): название категории.

Description (TEXT): описание категории.

Таблица **users:** хранится информация о пользователях системы. В таблице есть уникальный идентификатор *Id* в качестве первичного ключа. Также в таблице есть индекс *Email*, который гарантирует уникальность адресов электронной почты пользователей.

Id (INT, PK): уникальный идентификатор пользователя.

Username (VARCHAR): имя пользователя.

Email (VARCHAR): адрес электронной почты пользователя (уникальное поле).

Password (VARCHAR): пароль пользователя.

Admin (TINYINT): флаг, определяющий администратора (1) или обычного пользователя (0).

Createdate (TIMESTAMP): дата создания записи о пользователе.

Таблица **public_authors:** представляет собой связь между научными публикациями и их авторами. Она содержит уникальный идентификатор *id* в качестве первичного ключа. Кроме того, таблица содержит два внешних ключа: *Public_id*, который связан с идентификаторами публикаций из таблицы **publics**, и *Author_id*, который связан с идентификаторами авторов из таблицы **authors**. Эти внешние ключи обеспечивают целостность данных и поддерживают связи между различными сущностями в БД.

Id (INT, PK): уникальный идентификатор связи между публикацией и автором.

Public_id (INT, FK): внешний ключ, связывающий с таблицей publics, указывает на публикацию.

Author_id (INT, FK): внешний ключ, связывающий с таблицей authors, указывает на автора.

БД использует кодировку utf8mb4 для поддержки Unicode. Используется движок InnoDB для всех таблиц, что обеспечивает поддержку транзакций и внешних ключей. Индексы созданы для обеспечения быстрого доступа к данным по ключевым полям и поддержания целостности данных.

На рисунке 1 представлены основные таблицы БД.

Главная страница БД представлена на рисунке 2.

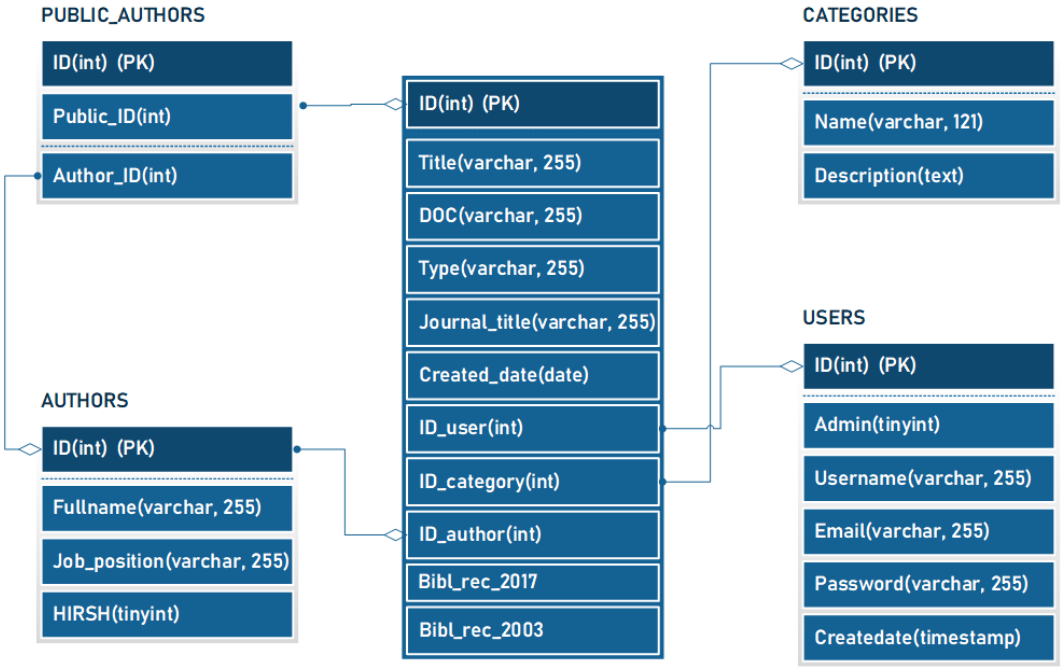


Рисунок 1. Структура БД, содержащая информацию о таблицах



Рисунок 2. Пользовательский интерфейс БД для хранения и систематизации научных публикаций

Условно, главную страницу можно разделить на 3 части: поиск, статистический материал, последние добавленные публикации. БД позволяет осуществлять поиск по автору и/или названию публикации/ключевым словам. Регистр не имеет значения, поиск осуществляется корректно в соответствии с запросом. Статистический материал наглядно показывает информацию в виде следующих категорий: Journal citations reports/Scopus; РИНЦ/Международные базы с ненулевым импакт-фактором; КОКНВО, материалы конференций; издательскую деятельность; прочие статьи и отчеты.

Рассмотрим каждую категорию отдельно.

– *Journal citations reports/Scopus:* научные работы в международных рецензируемых научных журналах, входящих в 1, 2 и 3 квартиль по данным Journal Citation Reports компании Clarivate Analytics, или имеющих в базе данных Scopus показатель процентиля по CiteScore хотя бы по одной из научных областей в соответствующих журналах, индексируемых в базе данных Web of Science Core (Arts and Humanities Citation Index, Science Citation Index Expanded, Social Sciences Citation Index), компании Clarivate Analytics. Такие материалы можно найти в базах Scopus и Web of Science.

– *РИНЦ/Международные базы с ненулевым импакт-фактором:* материалы, опубликованные в научных журналах, индексируемых РИНЦ и других международных базах с ненулевым импакт-фактором. Материалы чаще всего представлены на сайте e- library.ru – крупнейшем российском информационно-аналитическом портале в области науки, технологии, медицины и образования, содержащем рефераты и полные тексты более 38 млн научных публикаций и патентов, в том числе их электронные версии [7].

– *КОКНВО:* материалы в научных изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере образования Министерства просвещения Республики Казахстан.

– *Материалы конференций:* научные работы в материалах конференций, форумов, съездов, симпозиумов, конгрессов.

– *Издательская деятельность:* издательская деятельность включает в себя монографии, сборники трудов, буклеты и др.

– *Прочие статьи:* статьи, не попавшие ни в одну из перечисленных выше категорий.

– *Отчеты:* отчеты о научно-исследовательской деятельности.

Также, помимо категорий доступен вывод статистической информации о топ-авторах. Это те авторы, которые наиболее часто встречаются в публикациях, как «первый автор», так и «соавтор». Следующая статистика охватывает типы материалов, которые разделены на статьи, тезисы, монографии, авторефераты, сборники трудов.

Последние добавленные публикации представлены в виде карточек с отображением краткой информации о научном материале, об авторе, соавторах, названии и позволяющие скачать публикацию в формате pdf (рисунок 3).

Абсолютно всем пользователям доступна информация об авторах. При нажатии на любого автора выводится не только его личная информация, но и список всего научного материала, где он был автором или соавтором. Это относится и к категориям, и к типам материалов. При нажатии на целочисленное значение выводится список публикаций, доступных для прочтения.

Вся эта информация доступна для просмотра как обычному пользователю, так и администратору. Администратор имеет больше прав доступа и ему доступна админ-панель для занесения информации о публикациях, авторах, категориях, пользователях, редактирования и удаления этой информации. Таким образом, реализован многопользовательский режим, позволяющий регистрироваться новым пользователям и авторизовываться уже всем зарегистрировавшимся. При регистрации пользователей пароль в БД отображается уже как хешированный.

$pass = password_hash ($passFirst, PASSWORD_DEFAULT)

После выполнения этой строки переменная $pass будет содержать хешированный пароль, который можно сохранить в БД или использовать для проверки при аутентификации пользователей. Своего рода, это один из методов защиты данных в приложениях, особенно в контексте безопасности паролей пользователей. Хеширование пароля делает его нечитаемым для посторонних лиц, даже если база данных с хешами паролей будет скомпрометирована. На рисунке 4 показана панель управления, доступная для администратора.

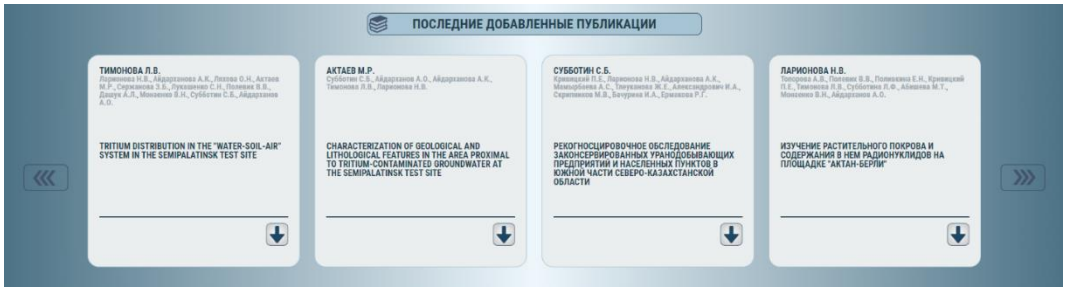


Рисунок 3. Последние добавленные публикации

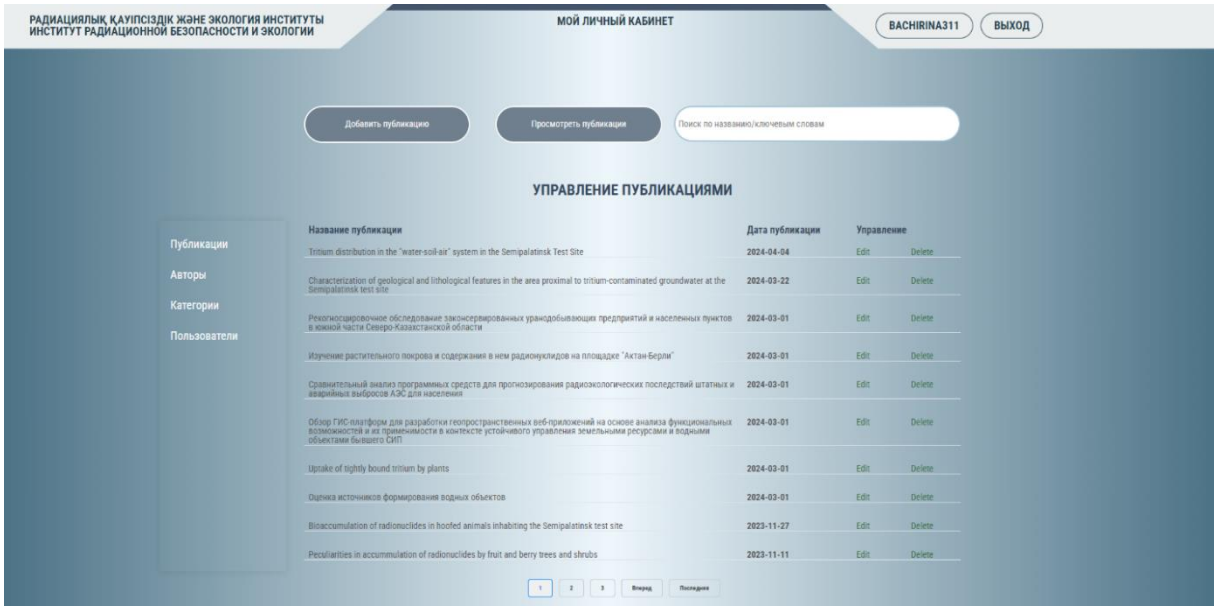


Рисунок 4. Панель администратора для управления публикациями



Рисунок 5. Научный материал Института за 2019 год

Отдельно имеется возможность предоставления статистических данных по типам материала за определенный промежуток времени, начиная с 1993 года по настоящее время, а также «все года». Это сделано для отображения количественных показателей, как результата деятельности за определенный период. Например, ниже представлен вывод всего научного материала Института радиационной безопасности и экологии за 2019 год (рисунок 5).

БД является эффективным инструментом для анализа данных, поскольку обладает широким спектром функций. Так, например, с помощью БД можно определить количество научного материала Института за последние 5 лет, начиная с 2020 по 2024 годы (рисунок 6). Из полученных данных видно, что пик публикаций приходится на 2021 год, что, вероятно, связано с мировыми событиями, в частности, с периодом после коронавируса. Увеличение числа тезисов, в свою очередь, может быть связано с участием в различных конференциях и семинарах сотрудников Института.

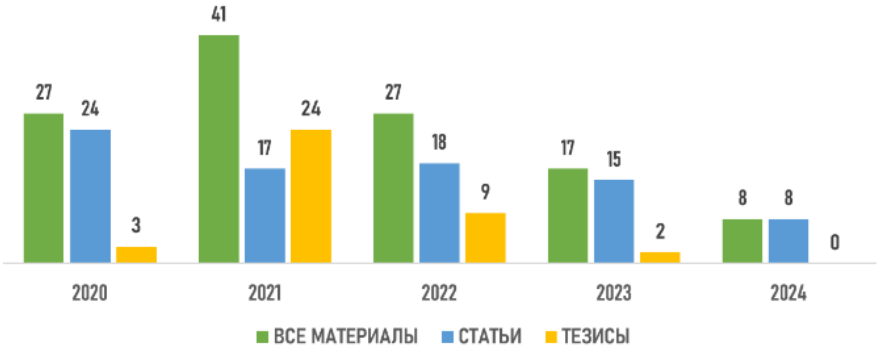
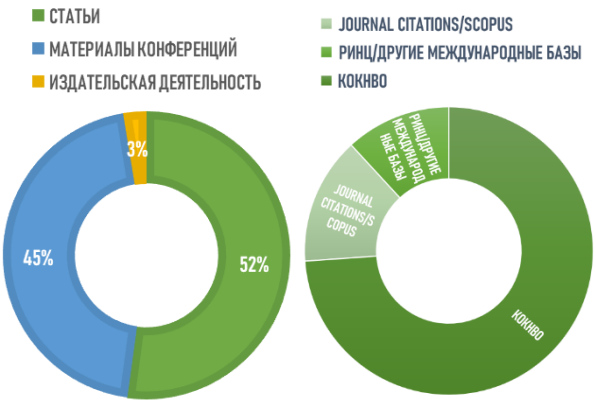


Рисунок 6. Статистика основных публикаций за последние 5 лет

Также с помощью инструментов БД можно оценить распределение публикаций по категориям. Для анализа были выбраны следующие типы научного материала: статьи; материалы конференций; издательская деятельность. Статьи в свою очередь подразделяются на следующие категории: Journal citations reports/Scopus; РИНЦ/Международные базы с ненулевым импакт-фактором; КОКНВО (визуализация представлена на рисунке 7). Из полученных статистических данных видно, что чаще всего научный материал публикуется в виде статей в КОКНВО – научных изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере образования Министерства просвещения Республики Казахстан.



а) б)

Рисунок 7. Распределение научного материала: публикаций по типам материала (а); статей по категориям (б)

Заключение

По результатам анализа научного материала Института радиационной безопасности и экологии, собранного за 30-летний период его деятельности, были определены ключевые функциональные требования к БД, направленные на хранение, организацию и анализ данных для обеспечения эффективного использования научной информации. В соответствии с требованиями к функциональности была организована структура БД, где определены таблицы, их поля и связи. Благодаря средствам (Ampps, Visual Studio Code, Google Chrome) и технологиям (HTML, CSS, JS, PHP), спроектирован пользовательский интерфейс, который обеспечивает корректное и эффективное взаимодействие пользователя и сервера. Разработанный пользовательский интерфейс предоставляет удобные средства для ввода, редактирования и поиска данных, а также обеспечивает наглядное отображение результатов. Определено, что БД является эффективным инструментом для анализа данных, поскольку обладает широким спектром функций, позволяющих проводить разнообразные виды анализа. Среди ключевых функций БД можно выделить возможность выборки данных в соответствии с заданными критериями, их сортировки по различным параметрам и извлечения для последующего анализа. Благодаря этим функциям пользователи могут эффективно проводить аналитическую работу, выявлять закономерности, тенденции и взаимосвязи в данных, что делает БД важным инструментом в исследованиях и принятии решений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках научной программы BR21882086 «Разработка устойчивого управления земельными ресурсами и водными объектами на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона».

Литература / References

1. Бачурина И.А. База данных, как электронный архив научной деятельности Института радиационной безопасности и экологии / Бачурина И.А., Топорова А.В., Ларионова Н.В. // Тезисы. X Международная конференция «Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала», 12-14 сентября 2023, стр. 110. [Bachurina I.A. Baza dannykh, kak elektronnyy arkhiv nauchnoy deyatel'nosti Instituta radiatsionnoy bezopasnosti i ekologii / Bachurina I.A., Toporova A.V., Larionova N.V. // Abstracts. X International Conference “Semipalatinsk Test Site: Legacy and Prospects for Scientific-Technical Potential Development”, September 12–14, 2023, p. 110. (In Rus.)]

2. National Library of Medicine PubMed [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/ (дата обращения 09.04.2024).
3. IEEE Xplore Advancing technology for humanity [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: https://www.ieee.org/about/vision-mission.html (дата обращения 09.04.2024).
4. Scopus: Comprehensive, multidisciplinary, trusted abstract and citation database [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: https://www.elsevier.com/products/scopus?dgcid=RN_AGCM_Sourced_300005030 (дата обращения 09.04.2024).
5. Ampps. Docs [Электронный ресурс]. -2024. – URL: https://ampps.com/docs/ (дата обращения 12.04.2024).
6. Visual Studio Code. Learn to code with Visual Studio Code [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: https://code.visualstudio.com/learn (дата обращения 12.04.2024).
7. Научная электронная библиотека e-library.ru. – 2024. – URL: https://www.elibrary.ru/defaultx.asp (дата обращения 12.04.2024) [Nauchnaya elektronnaya biblioteka e-library.ru. – 2024. – URL: https://www.elibrary.ru/defaultx.asp (date of access 12.04.2024) (In Rus.)].

ҒЫЛЫМИ ЖАРИЯЛАНЫМДАРДЫ САҚТАУ ЖӘНЕ ТАЛДАУ ҮШІН ДЕРЕКТЕР БАЗАСЫН ӘЗІРЛЕУ

И. А. Бачурина*, Н. В. Ларионова, А. В. Топорова

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

**Байланыс үшін E-mail: bachurina@nnc.kz*

Мақалада ғылыми жарияланымдарды тиімді сақтау, ұйымдастыру және талдау үшін деректер базасына (ДБ) қойылатын негізгі функционалдық талаптар қарастырылады. Радиациялық қауіпсіздік және экология институтының ғылыми қызметінің 30 жылдық кезеңіндегі материалдарды талдау негізінде, сондай-ақ пайдаланушылардың мүдделерін ескере отырып, ДБ функционалдығы мен құрылымына қойылатын талаптар айқындалды. Нәтижесінде пайдаланушы мен сервердің сенімді өзара әрекеттесуін қамтамасыз ететін құралдар мен технологияларды пайдалана отырып, ДБ жобаланды және әзірленді. Жасалған пайдаланушы интерфейсі деректермен жұмыс істеудің ыңғайлы құралдарын ұсынады. Деректер базасы деректерді талдаудың тиімді құралы болып табылады, өйткені ол талдаудың әртүрлі түрлерін жүргізуге мүмкіндік беретін көптеген функцияларға ие: берілген критерийлерге сәйкес деректерді іріктеу мүмкіндігі, оларды әртүрлі параметрлер бойынша сұрыптау және кейінгі талдау үшін алу. Осы мүмкіндіктердің арқасында пайдаланушылар аналитикалық жұмысты тиімді жүргізе алады, мәліметтердегі заңдылықтарды, тенденциялар мен қатынастарды анықтай алады, бұл деректер базасын зерттеу мен шешім қабылдауда қажетті құралға айналдырады.

Түйін сөздер: *деректер базасы, жарияланымдар, мақалалар, клиент-сервер қосымшасы, пайдаланушы интерфейсі.*

DEVELOPMENT OF A DATABASE TO STORE AND ANALYZE SCINTIFIC PUBLICATIONS

I. A. Bachurina*, N. V. Larionova, A. V. Toporova

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

** E-mail for contacts: bachurina@nnc.kz*

The article addresses key functional database (DB) requirements for the effective storage, arrangement and analysis of scientific publications. Based upon the materials analyzed over the 30-year period of scientific activities of the Institute of Radiation Safety and Ecology and considering users' interests, requirements for the functionality and structure of a database have been defined. As a result, a database was designed and developed using tools and technologies that ensured a secure interaction between a user and a server. The user interface created provides convenient tools for working with data. DB was found to be an efficient tool to analyze data since it has a wide range of functions enabling to carry out a variety of analyses: a possibility to retrieve data pursuant to specified criteria, sort it out by different parameters and select followed by the analysis. Thanks to these functions, users are able to carry out analytical activities efficiently, reveal regularities, tendencies and interrelations in data, which makes DB an indispensable tool in research and decision-making.

Keywords: *database, publications, articles, client-server application, user interface.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-21-28
УДК 621.039.003

ЭКСПРЕСС-МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ФИНАНСОВО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЕКТОВ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ, НА ПРИМЕРЕ НАМЕРЕНИЙ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ АЭС В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН

С. А. Мукенева*, Д. Б. Зарва, А. В. Гулькин

Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан

** E-mail для контактов: mukeneva@nnc.kz*

Энергетика – это основа успешного развития экономики и общества в целом. Однако, уже на сегодняшний день Казахстан испытывает нехватку электроэнергии и в соответствии с прогнозами к 2029 году ожидается дефицит электрической мощности свыше 3 ГВт. Поэтому строительство атомной электростанции сегодня является одной из актуальных тем повестки дня нашей страны. В связи с этим необходимо всесторонне изучить и профессионально проработать все сферы связанные со строительством АЭС.

Финансово-экономическое моделирование является известным инструментом прогнозирования, планирования и управления в бизнесе. Как правило, именно с ФЭМ (финансово-экономической модели) начинаются анализы бизнес-идей, и если оценки, представленные в модели, показывают эффективность бизнес-проекта, то инвесторы готовы рассматривать проект более подробно и, в конечном итоге, вкладывать в него свои средства.

Обычно достаточно полная ФЭМ строится на стадии технико-экономического обоснования (ТЭО) инвестиционного проекта, когда уже определены основные проектно-конструкторские решения и организационно-административные мероприятия (включая финансовые схемы). Анализ модели и оценка финансово-экономических показателей с ее помощью позволяют принимать решение о дальнейшей реализации проекта. В случае проекта строительства АЭС, где удельные капитальные затраты на строительство станции в двухблочном исполнении суммарной мощностью до 2,4–2,7 ГВт составляют порядка 10–12 млрд. долларов США, финансовые затраты на разработку ТЭО могут достигать величины более 100 млн долларов США, а время, требующееся на подготовку ТЭО в полном объеме – около 3 лет.

Предлагаемая к рассмотрению методика представляет собой экспресс-метод построения ФЭМ проектов строительства АЭС, в достаточной степени устойчивый по отношению к статистической неточности некоторых исходных данных, для определения финансовой эффективности и устойчивости проектов АЭС. Данная методика по совокупности используемых данных и подходов к экономической оценке крупных инвестиционных проектов атомной энергетической отрасли обладает определенной новизной и может использоваться при сравнении большого количества проектов строительства АЭС с разными исходными данными в целях экспресс-выбора нескольких оптимальных для их более детального исследования. Учитывая принятый курс Республики Казахстан, как и множества интенсивно развивающихся стран мира, на декарбонизацию энергетического сектора и промышленности, данная работа представляется весьма актуальной.

В настоящей работе представлены список и способы нахождения компонентов финансово-экономической модели АЭС в Казахстане, критерии эффективности инвестиционных проектов, оценка рисков проектов, а также проведена валидация методики.

Ключевые слова: *атомная энергетика, финансово-экономическая модель, NPV, IRR, LCOE.*

Введение

В простых с точки зрения технологической сложности отраслях и/или в отраслях с относительно небольшими уровнями капиталовложений структура, содержание и построение ФЭМ хорошо изучены и стандартизованы. Ядерная энергетика в этом смысле специфична, поскольку имеет ряд особенностей, и хотя постоянно проводятся исследования, и по их результатам вырабатываются решения и рекомендации, до сих пор не сложилось единого мнения о том, как следует учитывать эти особенности в экономических расчетах. А неоднозначность решений по упомянутым ключевым вопросам экономики АЭС может привести к существенным неопределённостям в построении ФЭМ и реализации проекта АЭС в Республике Казахстан в целом.

Цель настоящей работы состояла в разработке экспресс-метода построения ФЭМ проектов строительства АЭС, определения финансовой эффективности и устойчивости проектов. Также проведение валидации данной методики на основе ретроспективного анализа проектов строительства АЭС с разными типами реакторов, которые ранее рассматривались для реализации в Казахстане. Данная методика может использоваться при сравнении большого количества проектов строительства АЭС и выбора нескольких для их более детального исследования. В данной методике затраты на выработку электрической энергии рассчитываются исходя из некоторых обобщений и допущений, которые хорошо согласовываются с реальными данными.

Методика оценки экономической эффективности проектов строительства АЭС основана на принципах, примененных в работе [1]:

- проект рассматривается на протяжении всего жизненного цикла (расчетного периода) — от прединвестиционных исследований до вывода из эксплуатации атомной электростанции, включая демонтаж АЭС;
- моделирование потоков, включенных в модель (деньги, ресурсы, продукция);
- доходы и расходы на протяжении всего жизненного цикла проекта приводятся к экономической соизмеримости в начальном периоде;
- экономическая эффективность проекта определяется посредством сравнения затрат и ожидаемых результатов;
- использование текущих (базисных), прогнозных и дефлированных (расчетных) цен.

Первым шагом при построении ФЭМ АЭС является рассмотрение следующих вопросов:

- технологическая схема реализации проекта: мощность АЭС, тип реактора, оснащённость и т.д.;
- определение стоимостных параметров проекта;
- определение источников финансирования проекта АЭС [2, 3];
- выбор стратегии обращения с РАО и ОЯТ.

Исходные данные, формирование перечня и способов нахождения компонентов финансово-экономической модели АЭС

Методика построения ФЭМ состоит из нескольких этапов, на первом этапе определяются исходные данные и далее с помощью исходных данных определяются компоненты ФЭМ.

Капитальная составляющая

В соответствии с принятой в документах МАГАТЭ [4] классификацией, структура мгновенных капитальных затрат на строительство АЭС выглядит следующим образом:

- прямые затраты;
- косвенные затраты.

Затраты на топливо

Метод определения затрат на топливо с помощью которого был рассчитан данный компонент приведен в работе **[**5**].** Затраты на топливо зависят от выбранного топливного цикла, и они начинают расходоваться до начала эксплуатации АЭС и продолжают после останова реактора. Масса топлива для первой и последующих загрузок определяется из нейтронно-физических характеристик реакторов и их количества.

Амортизационные затраты

Амортизационные затраты наряду с затратами на топливо составляют наиболее значительную часть стоимости выработки электроэнергии, а сама эта величина может значительно колебаться в зависимости от метода расчета.

Чаще всего амортизацию начисляют линейным способом. В этом случае, начисление амортизации осуществляется равными долями, при этом размер амортизации для каждого года определяется умножением нормы амортизации на балансовую стоимость. После достижения определенной остаточной стоимости объекта дальнейшее начисление амортизации не производится.

Затраты на текущий ремонт

Эти статьи расходов существенным образом зависят от мощности и типа станции, от организационной структуры. Диапазоны величин этих расходов могут быть значительными, и достаточно точно их определить можно лишь при детальном расчете с учетом достаточно большого количества исходных данных. В случае укрупненных оценок затраты на текущий ремонт рассчитываются как доля от амортизационных отчислений $И_{т.р} = 0{,}18 И_{ам}$, при этом долевой коэффициент установлен на основе опыта эксплуатации АЭС в России.

Фонд заработной платы и другие отчисления (ФОТ)

Расходы на заработную плату и социальные отчисления зависят от количества персонала, занятого на АЭС, и его средней заработной платы.

$$И_{з.п} = m_{з.п} \cdot N_e^{бр} \cdot S_{з.п}^{год} + \left(соц.налог + СО + ОСМС\right),$$

где: $m_{з.п}$ – штатный коэффициент эксплуатационного персонала, чел/МВт (эл.); $N_e^{бр}$ – электрическая мощность (брутто), МВт; $S_{з.п}^{год}$ – среднегодовая заработная плата персонала; *ОСМС* – отчисления на медицинскую страховку, принятые в Казахстане. Социальный налог рассчитывается в соответствии с [6]:

$$соц.налог = \left(ЗП - ПВ - ВС\right) \cdot 9{,}5 - СО,$$

где: *ЗП* – заработная плата; *ПВ* – пенсионные взносы; *ВС* – взносы на страхование; *СО* – социальные отчисления.

Социальные отчисления рассчитываются в соответствии с [7]: $СО = \left(ЗП - ПВ\right) \cdot 3{,}5\%$.

Обязательное социальное медицинское страхование в соответствии с [8]: $ОСМС = ЗП \cdot 3\%$.

Страхование

Ввиду наличия радиационной и ядерной опасности при эксплуатации атомной станции ее функционирование должно сопровождаться обязательным страхованием ответственности «перед третьими лицами», затраты на которое существенно разнятся в разных странах в зависимости от действующего законодательства.

Прочие расходы

Данная статья включает в себя различные расходы, связанные с обслуживанием станции: оплата услуг связи; оплатой услуг сторонних организаций по проведению ежегодных профилактических осмотров персонала, работающего во вредных и особо вредных условиях труда; оплатой услуг по техническому обслуживанию и освидетельствованию основного и вспомогательного оборудования; командировочные

расходы; затраты на приобретение расходных материалов и запчастей, специальной одежды, специальной обуви, других средств индивидуальной защиты и медицинской помощи и т.д. Величина таких расходов может существенно варьироваться в зависимости от типа и мощности реакторной установки и может быть принята в размере 2,5–5 кратного размера годового фонда оплаты труда.

Затраты на обслуживание кредита

Затраты по данной статье в значительной степени зависят от той схемы финансирования сооружения АЭС, которая принята. Привлечение частных иностранных инвестиций в качестве доли в уставный капитал АЭС на сегодняшний день возможно только в виде кредитов при наличии надежного обеспечения возвратности кредита.

Налог на землю и на имущество

Согласно Налоговому Кодексу Республики Казахстан необходимо ежегодно отчислять в бюджет налог на имущество и земельный налог, которые рассчитываются по налоговым ставкам:

земельный налог = $S_з$·базовая става налога на землю

где $S_з$ – площадь земельного участка.

Затраты на вывод АЭС из эксплуатации

В Казахстане законодательно не утверждены внебюджетные фонды, обязательные для финансирования из средств АЭС (например, такие, как отчисления во внебюджетный фонд НИОКР и др.), однако «ликвидационный резерв» – затраты на снятие АЭС с эксплуатации – обязательно должны быть учтены.

Затраты на вывод АЭС из эксплуатации составляли 416 и 595 млн долларов США соответственно при удельных капитальных затратах 1365$ за кВт эл. для AP1000 и 1600$ за кВт эл. для ABWR в ценах 2004 г [9]. Эти данные позволяют оценить затраты на вывод АЭС из эксплуатации и определить их стоимостной диапазон в 27–33 % от общей суммы мгновенных капитальных затрат [10].

КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА АЭС

Вторым этапом в методике идет определение критериев эффективности проекта. При расчете критериев эффективности проекта, проводится расчет для базовых значений. На этом этапе происходит создание модели, способной прогнозировать эффективность проекта.

Полная приведённая стоимость электроэнергии (LCOE)

Величина *LCOE*, представляющая собой минимальную стоимость поставляемой электроэнергии [11], и является одним из основных критериев конкурентоспособности различных проектов электростанций [12].

LCOE рассчитывается по следующей формуле:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^{n} \frac{I_t + M_t + F_t + Carbon_t + D_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{n} \frac{E_t}{(1+r)^t}},$$

где I_t – инвестиционные затраты в год t, M_t – операционные затраты и затраты на содержание в год t, F_t – затраты на топливо в год t, $Carbon_t$ – затраты на выбросы парниковых газов в год t, D_t – затраты на вывод из эксплуатации и обращение с отходами в год t, E_t – производство электроэнергии в год t, r – ставка дисконтирования, n – жизненный цикл системы.

Чистая приведенная стоимость, внутренняя норма доходности и период окупаемости

Для сравнения экономической эффективности инвестиционных проектов используются три критерия: чистая приведенная стоимость (*NPV*), внутренняя норма доходности (*IRR*) и период окупаемости.

Чистая приведенная стоимость рассчитывается по следующей формуле:

$$NPV = \sum_{t=T}^{T_i} \frac{R_t - C_t}{(1+r)^t} = -\sum_{t=1}^{T_c} \frac{K_t}{(1+\mathrm{r})^t} + \sum_{T_c+1}^{T} \frac{R_t + Y_t}{(1+\mathrm{r})^t},$$

где: $R_t - C_t$ – чистая прибыль в году t, определяемая как разность между потоком ожидаемой ежегодной выручки и потоком ожидаемых расходов.

Отрицательное или положительное значение критерия *NPV* показывает, является ли проект прибыльным и в какой степени.

Чтобы найти период окупаемости (срок возврата инвестиций), достаточно верхний предел суммирования T заменить на T_{OK} и приравнять *NPV* нулю. Данный критерий также определяется последовательным расчетом *NPV(t)* как функции времени (продолжительности жизненного цикла T).

Внутренняя норма доходности проекта показывает ставку кредита, при которой не будет получен убыток от инвестиций т.е. результатом всех денежных притоков и оттоков в сумме будет ноль, находится *IRR* из следующего выражения:

$$0 = \sum_{t}^{T_i} \frac{R_t - C_t}{(1+IRR)^t}.$$

Важно подчеркнуть, что для безубыточности проекта ставка дисконтирования может варьироваться в пределах от нуля до *IRR*. Величина *IRR* важна также для оценки верхнего уровня процентной ставки привлеченных финансовых ресурсов (кредита). Соответственно, чем выше *IRR*, тем больше возможностей найти необходимое количество инвестиционных ресурсов на рынке. Чем больше величина *IRR* и разность ($IRR - r$), тем более положительным оказывается *NPV* и тем устойчивее проект.

Оценка рисков проектов и достоверности полученных финансовых результатов с помощью метода Монте-Карло

Каждый проект строительства, а проект строительства АЭС в особенности, уникален. Поэтому на этапе проектирования проекта строительства АЭС возникает много неопределённостей, которые необходимо учитывать и анализировать устойчивость и риски проекта [13, 14].

На сегодняшний день, одним из наиболее информативных и приближенных к реальности методом нахождения рисков инвестиционных проектов является имитационное моделирование с применением метода Монте-Карло. Данный метод учитывает специфику проекта, полученные вероятностные распределения позволяют оценить достоверность полученных финансовых результатов и эффективность проекта в целом [15].

Метод Монте-Карло содержит следующие этапы:

1) Выбираются один или несколько критериев эффективности проекта. Ранее определяется базисное значение данных критериев.

2) Выбираются изменяющиеся параметры, к изменению которых наиболее чувствительны критерии эффективности. Это происходит с помощью анализа чувствительности. Общая схема анализа чувствительности критериев эффективности состоит в «последовательно-единичном» изменении каждого параметра ФЭМ (например, на 10–15%), далее пересчитывается новая величина критерия. После этого оценивается процентное изменения критерия по отношению к базисному случаю и рассчитывается показатель чувствительности.

3) Далее определяется сценарный анализ, для определения границы диапазона изменений входящих параметров. Необходимо оценить, как именно выглядит статистическое распределение изменяющихся параметров. Простейший вариант – равномерное распределение и нормальное распределение. К сожалению, такие распределения случайных величин не очень часто соответствует действительности, чаще всего экономические показатели изменяются по более сложному логнормальному распределению.

4) Создается математическая модель, которая вычисляет результат с учетом выбранных изменяемых параметров, наряду с этим модель содержит параметры, которые являются константами. С помощью средств автоматизации расчетов запускается цикл из требуемого числа повторений (больше 1000 реализаций по каждой случайной величине), на каждом шагу которого получают случайные значения параметров в соответствии с их законом распределения. Далее вычисляется результат и накапливается статистика по полученному результату.

5) Анализ результатов. По итогам моделирования получают результаты расчетов выбранного критерия эффективности проекта, по этим результатам строится диаграмма нормального распределения данного показателя. На основании характеристик распределения инвестиционного показателя определяется устойчивость характеристик проекта [16, 17].

Ретроспективный анализ проектов, ранее предлагавшихся к реализации

Определение технико-экономических показателей, в частности, себестоимости электроэнергии, вырабатываемой на предполагаемых к строительству АЭС, проводилось неоднократно в разные периоды времени в рамках различных предпроектных исследований. Рассматривались проекты строительства АЭС с доступными, известными и проработанными технико-экономическими и эксплуатационными показателями [18, 19, 20], однако на этом этапе был выбран только один проект «Строительство атомной станции с РУ ВВЭР-640 на Балхаше» (БАЭС, 1997 г.), как наиболее близко соответствующий для использования в качестве бенчмарка.

Ниже представлены основные технико-экономические характеристики данного проекта строительства АЭС.

Таблица 1. Основные технико-экономические и эксплуатационные показатели реакторов (в ценах, соответствующих проектам лет)

Параметры		ВВЭР-640
Электрическая мощность АЭС, МВт		645×3
Капитальные вложения (стоимость строительства АЭС), млн $		3077,185
Объем генерируемой электроэнергии, ГВт·час		13545
Отпуск электроэнергии для продажи, ГВт·час		12713,3
Численность промышленно-производственного персонала, чел		1017
Площадь промплощадки, га		–*
Потребность в воде, м^3/сут.		–*
Срок службы АЭС, лет		50
Плата за кредит, %		2,54
Затраты на топливо, млн $/год		–*
Топливо	ТВС, шт.	163×3
	диаметр/длина твэла, мм	9,1/3530
	обогащение по U-235 (первая загрузка/подпитка), %	4,26/3,18
	загрузка урана (первая/в комплекте подпитки), т	66/10

* – нет данных.

Далее определяются компоненты ФЭМ и критерии эффективности. Результаты расчетов экономических критериев представлены в таблице 2.

На данном этапе расчетов для оценки достоверности и адекватности выбранной методики формирования ФЭМ можно провести валидацию методики. Для этого сравнивается значение *LCOE*, полученное в ходе расчета, с приведенным в проекте.

Как видно из таблицы 3, значение *LCOE*, полученное в ходе расчетов, лежит в диапазоне значений ±15% от проектного, что для экспресс-методики, построенной на общих подходах**,** является хорошим результатом.

Таблица 2. Результаты расчетов экономических показателей проектов, рассмотренных ранее, для строительства в Республике Казахстан

Показатели	ВВЭР-640
LCOE, цент/кВт·ч	2,24
Тариф, цент/кВт·ч	5
IRR (внутренняя норма прибыли), %	11
Ставка дисконтирования 5%	
– *NPV*, млн $	3814,38
– срок окупаемости, лет	14
Ставка дисконтирования 7%	
– *NPV*, млн $	1934,84
– срок окупаемости, лет	17

Таблица 3. Сравнение значений LCOE

Показатель	Расчитанное значения	Значение, приведенное в проекте
LCOE, цент/кВт·ч	2,25	2,6

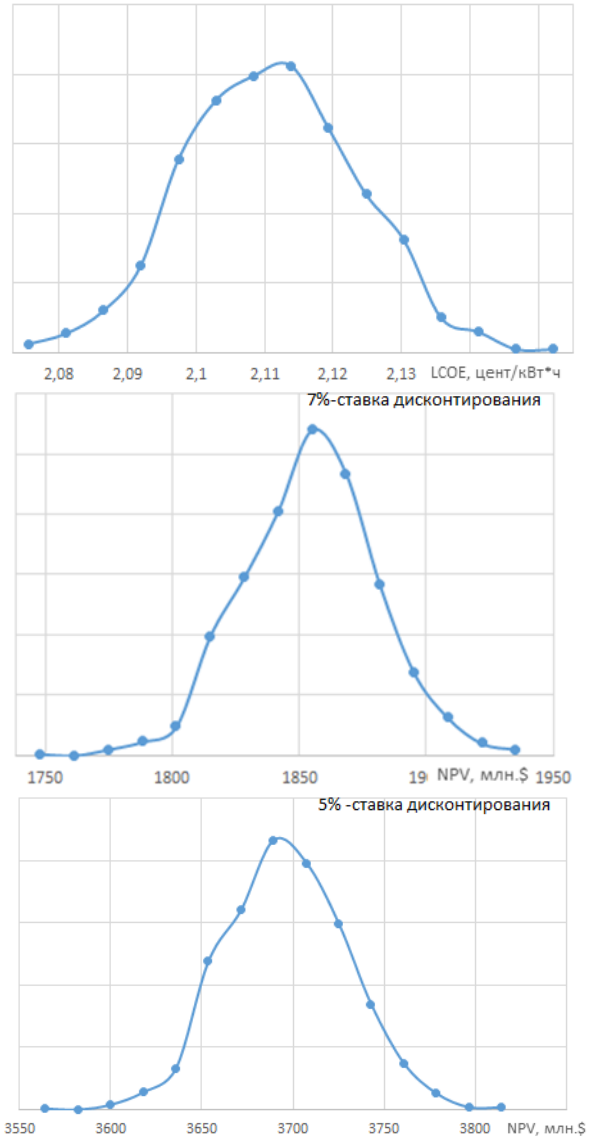


Рисунок. Результаты расчетов рисков проекта строительства АЭС с РУ ВВЭР-640

Далее рассчитывается насколько проект устойчив, для этого рассчитываются риски проектов. Для рассмотрения рисков проектов рассматриваются вероятностные распределения *NPV* и *LCOE*. Значение чистого дисконтированного дохода NPV является основным критерием при оценке эффективности любого инвестиционного проекта, а приведенная стоимость электроэнергии *LCOE* – проекта, связанного с производством электроэнергии.

Найденные критерии эффективности проекта, представленные в таблице 2, в дальнейшем расчете, выступают как базовые для определения рисков проектов. Выполняются расчеты выходных параметров для каждого года эксплуатации АЭС, которые позволяют получить результаты с учетом выбранных варьируемых входных параметров. Статистическое распределение входных параметров – нормальное распределение, предполагающее, что вероятность отклонения значений постепенно падает с удалением от среднего.

На рисунке представлены вероятностные распределения *LCOE* и *NPV*, полученные в результате расчетов.

Как видно из рисунка, при выбранном тарифе и рассмотренных ставках дисконтирования рассматриваемый проект строительства АЭС является экономически выгодным и устойчивым к меняющимся внешним условиям функционирования проекта. Данные утверждения являются важнейшими составляющими при принятии решения о реализации проекта. Наиболее вероятный диапазон изменения значений для *LCOE* лежит в пределах 2,11–2,12 цент/кВт·ч.

Заключение

Предлагаемая методика позволяет достаточно быстро и точно определять приведенную стоимость электроэнергии, критерии эффективности и устойчивость проекта АЭС, как объекта атомной энергетической отрасли в целом.

Для повышения достоверности результатов экономического моделирования ФЭМ в расчетах следует внимательно оценивать входящие параметры, проводить маркетинговые исследования в отношении диапазонов изменения возможных значений компонентов ФЭМ на текущий момент и в перспективе жизненного цикла АЭС, уделив особое внимание специфическим для атомной энергетики аспектам, включаемым в ФЭМ. К таким аспектам относятся: экономические параметры различных вариантов реализации технологий обращения с РАО, обращения с ОЯТ, формирования фондов вывода из эксплуатации АЭС и др., формирующие часть эксплуатационных расходов АЭС.

При моделировании значений варьируемых параметров финансовых величин стоит особо обратить внимание на выбранный закон распределения случайных величин, в большинстве случаев для экономических величин используется логнормальное распределение [21].

Предложенная методика может быть рекомендована для экспресс-селекции представительного количества проектов АЭС, с целью выбора оптимальных проектов для дальнейшего детального их исследования.

В дальнейшем на основе предложенной методики планируется разработка детализированной матрицы методики формирования ФЭМ реализации атомно-энергетического проекта в Казахстане в современных макроэкономических условиях. На основе полученной матрицы планируется рассмотреть несколько проектов строительства АЭС с перспективными к строительству типами реакторов. Данная работа будет способствовать расчету базовых значений критериев эффективности рассмотренных проектов, планируемых к реализации при помощи имитационного моделирования с применением метода Монте-Карло. На финальном этапе предполагается оценить непосредственно риски и устойчивость рассмотренных проектов.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Проект программно-целевого финансирования BR21882185 «Исследования в поддержку создания и безопасного функционирования атомной электростанции в Республике Казахстан»).

Литература

1. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов / официальное издание. – М.: Экономика. – 2000.
2. Иванов, Т.В. Методология финансирования как составляющая успешной реализации проектов сооружения АЭС / Т.В. Иванов, Ю.В. Черняховская // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. 2.
3. Черняховская, Ю.В. Государственно-частное партнерство в атомной энергетике: опыт США/ Черняховская, Ю.В., Корольков, Д.Л. // Вестник Финансового Университета. – 2017.
4. Economic evaluation of bids for nuclear power plants / Technical reports series No. 396 // International Atomic Energy Agency. – Vienna. – 2000.
5. Экономика ядерного топливного цикла / Агентство по ядерной энергии организация экономического сотрудничества и развития. – Москва. – 1999.
6. Налоговый кодекс РК / Раздел 12. – глава 54. - статья 482–485. – 2022
7. Закон Республики Казахстан «Об обязательном социальном страховании» (с изменениями и дополнениями по состоянию на 01.01.2022 г.) / от 26 декабря 2019 года. – № 286-VI.
8. Закон Республики Казахстан «Об обязательном социальном медицинском страховании» (с изменениями и дополнениями по состоянию на 30.12.2021 г.) / от 16 ноября 2015 года. – № 405-V.
9. The economic future of nuclear power / The University of Chicago. – 2004.
10. Cost estimating guidelines for generation IV nuclear energy systems / The Economic Modeling Working Group of the Generation IV. – International Forum. – 2007.
11. Carlo, M. The costs of generating electricity and the competitiveness of nuclear power / Mari Carlo // Progress in Nuclear Energy. – 2014. – Vol. 73.
12. Харитонов, В.В. Критерии окупаемости инвестиций в ядерную энергетику/ В.В. Харитонов, Н.Н. Костерин // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика – 2017. – № 2.
13. Кавыршина, О.А. Принципы и проблемы формирования финансово-экономической модели промышленного предприятия / О.А. Кавыршина, О.В. Хорошилова // Вестник воронежского государственного технического университета.– 2013.– Т. 9, № 6–2.– С. 130–134.
14. Мельников, Ю. Б. Улучшение адекватности экономических моделей / Ю. Б. Мельников, Е. А. Онохина, С. А. Шитиков // Известия Уральского государственного экономического университета.– 2018.– Т.19. – № 1.– С. 94–106.
15. Денисова, Т.В. Методика Анализа Достоверности Вариантов Оптимизации Инвестиционных Проектов», Т.В. Денисова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т.16. – № 6(2).
16. Айвазян, С.А. Оценка экономической эффективности мероприятий банка по рекламированию кредитных продуктов / С.А. Айвазян, М.Ю. Афанасьев, А.М. Афанасьев // Прикладная эконометрика. – 2009. – № 4.
17. Золотов, М.И. Оценка достоверности полученных финансовых результатов инвестиционных проектов посредством применения анализа метода Монте-Карло / М.И. Золотов // Учетно-аналитическое обеспечение-информационная основа экономической безопасности хозяйствующих субъектов. – 2009.
18. АТЭЦ малой мощности с РУ типа КЛТ-40 в Республике Казахстан. Обоснование инвестиций в строительство АТЭЦ для энергоснабжения Лениногорского комбината и города Лениногорска (I этап) / Пояснительная записка. – Инв. В А-62651. – г. Нижний Новгород. – 1997.
19. Технико-экономическое обоснование инвестиционного проекта «Строительство атомной станции с РУ ВБЭР-300 в Мангистауской области / Книга 1. – АО «КРКАС». – 2008
20. Балхашская АЭС, Технико-Экономическое Обоснование строительства, часть 12, Сметная стоимость и технико-экономические показатели / Пояснительная записка. – БА-00-01 ТЭО. – Санкт-Петербург. – 1997.
21. Айвозян, С.А. Прикладная статистика и основы эконометрики / С.А. Айвозян, В.С. Мхитарян // учеб. для вузов. - М.: ЮНИТИ. – 1998.

References

1. Metodicheskie rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnykh proektov / ofitsial'noe izdanie. – Moscow: Ekonomika, 2000.
2. Ivanov, T.V. Metodologiya finansirovaniya kak sostavlyayushchaya uspeshnoy realizatsii proektov sooruzheniya AES / T.V. Ivanov, Yu.V. Chernyakhovskaya // Vestnik IGEU. – 2010. – Issue 2.
3. Chernyakhovskaya, Yu.V. Gosudarstvenno-chastnoe partnerstvo v atomnoy energetike: opyt SShA/ Chernyakhovskaya, Yu.V., Korol'kov, D.L. // Vestnik Finansovogo Universiteta. – 2017.

4. Economic evaluation of bids for nuclear power plants / Technical reports series No. 396 // International Atomic Energy Agency. – Vienna. – 2000.
5. Ekonomika yadernogo toplivnogo tsikla / Agentstvo po yadernoy energii organizatsiya ekonomicheskogo sotrudnichestva i razvitiya. – Moscow. – 1999.
6. Nalogovyy kodeks RK / Razdel 12. – glava 54. – stat'ya 482–485. – 2022
7. Zakon Respubliki Kazakhstan “Ob obyazatel'nom sotsial'nom strakhovanii” (s izmeneniyami i dopolneniyami po sostoyaniyu na 01.01.2022 g.) / ot 26 dekabrya 2019 goda. – No. 286-VI.
8. Zakon Respubliki Kazakhstan “Ob obyazatel'nom sotsial'nom meditsinskom strakhovanii” (s izmeneniyami i dopolneniyami po sostoyaniyu na 30.12.2021 g.) / ot 16 noyabrya 2015 goda. – No. 405-V.
9. The economic future of nuclear power / The University of Chicago. – 2004.
10. Cost estimating guidelines for generation IV nuclear energy systems / The Economic Modeling Working Group of the Generation IV. – International Forum. – 2007.
11. Carlo, M. The costs of generating electricity and the competitiveness of nuclear power / Mari Carlo // Progress in Nuclear Energy. – 2014. – Vol. 73.
12. Kharitonov, V.V. Kriterii okupaemosti investitsiy v yadernuyu energetiku/ V.V. Kharitonov, N.N. Kosterin // Izvestiya VUZov. Yadernaya energetika – 2017. – No. 2.
13. Kavyrshina, O.A. Printsipy i problemy formirovaniya finansovo-ekonomicheskoy modeli promyshlennogo predpriyatiya / O.A. Kavyrshina, O.V. Khoroshilova // Vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2013. – Vol. 9. – No. 6–2.– P. 130–134.
14. Mel'nikov, Yu. B. Uluchshenie adekvatnosti ekonomicheskikh modeley / Yu. B. Mel'nikov, E. A. Onokhina, S. A. Shitikov // Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta.– 2018.– Vol. 19. – No. 1.– P. 94–106.
15. Denisova, T.V. Metodika Analiza Dostovernosti Variantov Optimizatsii Investitsionnykh Proektov», T.V. Denisova // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. – 2014. – Vol. 16. – No. 6(2).
16. Ayvazyan, S.A. Otsenka ekonomicheskoy effektivnosti meropriyatiy banka po reklamirovaniyu kreditnykh produktov / S.A. Ayvazyan, M.Yu. Afanas'ev, A.M. Afanas'ev // Prikladnaya ekonometrika. – 2009. – No. 4.
17. Zolotov, M.I. Otsenka dostovernosti poluchennykh finansovykh rezul'tatov investitsionnykh proektov posredstvom primeneniya analiza metoda Monte-Karlo / M.I. Zolotov // Uchetno-analiticheskoe obespechenie-informatsionnaya osnova ekonomicheskoy bezopasnosti khozyaystvuyushchikh sub’ektov. – 2009.
18. ATETs maloy moshchnosti s RU tipa KLT-40 v Respublike Kazakhstan. Obosnovanie investitsiy v stroitel'stvo ATETs dlya energosnabzheniya Leninogorskogo kombinata i goroda Leninogorska (I etap) / Poyasnitel'naya zapiska. – Inv. B A-62651. – g. Nizhniy Novgorod. – 1997.
19. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie investitsionnogo proekta “Stroitel'stvo atomnoy stantsii s RU VBER-300 v Mangistauskoy oblasti” / Kniga 1. – AO “KRKAS”. – 2008
20. Balkhashskaya AES, Tekhniko-Ekonomicheskoe Obosnovanie stroitel'stva, chast' 12, Smetnaya stoimost' i tekhniko-ekonomicheskie pokazateli / Poyasnitel'naya zapiska. – BA-00-01 TEO. – Sankt-Peterburg. – 1997.
21. Ayvozyan, S.A. Prikladnaya statistika i osnovy ekonometriki / S.A. Ayvozyan, V.S. Mkhitaryan // ucheb. dlya vuzov. – Moscow: YuNITI. – 1998.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНДА АЭС САЛУ ЖӨНІНДЕГІ ЖОСПАРЛАР ҮЛГІСІНДЕ ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНДА АТОМ ЭНЕРГЕТИКАСЫ САЛАСЫНДАҒЫ ЖОБАЛАРДЫҢ ҚАРЖЫ-ЭКОНОМИКАЛЫҚ МОДЕЛІН ҚҰРУДЫҢ ЭКСПРЕСС-ӘДІСІ

С. А. Мукенева*, Д. Б. Зарва, А. В. Гулькин

Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы, Курчатов, Қазақстан

** Байланыс үшін E-mail: mukeneva@nnc.kz*

Энергетика дегеніміз экономика мен бүкіл қоғамның ойдағыдай дамуының негізі. Алайда бүгінгі күні Қазақстан электр энергиясының тапшылығын сезінуде және болжамдарға сәйкес 2029 жылға қарай 3 ГВт-тан астам электр қуатының тапшылығы болжалып отыр. Сондықтан атом электр станциясының құрылысы бүгінде еліміздің күн тәртібіндегі өзекті тақырыптардың бірі болып табылады. Осыған байланысты атом электр станцияларын салуға байланысты барлық салаларды жан-жақты зерделеу және кәсіби пысықтау қажет.

Қаржы-экономикалық модельдеу бизнестегі болжау, жоспарлау және басқарудың белгілі құралы. Әдетте бизнес-идеяларды талдау ҚЭМ-нен (қаржы-экономикалық моделден) басталады, ал егер моделде ұсынылған баға берулер бизнес-жобаның тиімділігін көрсетсе, онда инвесторлар жобаны толығырақ қарастыруға және сайып келгенде, оған өз қаражаттарын салуға дайын.

Әдетте толыққанды ҚЭМ негізгі конструкторлық жобалау шешімдері мен ұйымдастырушылық-әкімшілік іс-шаралар (қаржылық схемаларды қоса алғанда) анықталған кезде инвестициялық жобаның техникалық-экономикалық негіздемесі (ТЭН) сатысында құрылады. Моделді талдау және оның көмегімен қаржы-экономикалық көрсеткіштерді бағалау жобаны одан әрі іске асыру туралы шешім қабылдауға мүмкіндік береді. Жалпы қуаттылығы 2.4–2.7 ГВТ дейінгі екі блок етіп жасалған станция құрылысына үлестік күрделі шығындар шамамен 10–12 млрд. АҚШ долларын құрайды, ТЭН әзірлеуге жұмсалатын қаржы шығындары 100 млн. АҚШ долларынан астам шамаға жетуі мүмкін, ал ТЭН-ді толық көлемде дайындауға қажет болатын уақыт – шамамен 3 жыл.

Қарауға ұсынылып отырған әдістеме АЭС жобаларының қаржылық тиімділігі мен тұрақтылығын айқындауға арналған кейбір бастапқы деректердің статистикалық дәлсіздігіне қатысты жеткілікті дәрежеде АЭС құрылысының тұрақты жобаларының ҚЭМ құрудың экспресс-әдісі болып табылады. Атом энергетикасы саласының ірі инвестициялық жобаларын экономикалық бағалауға қолданылатын мәліметтер мен тәсілдер жиынтығы болғандықтан бұл әдістеме белгілі бір дәрежедегі жаңалық және әртүрлі бастапқы деректерін салыстыра отырып АЭС құрылысының көптеген жобаларын егжей-тегжейлі зерттеу кезінде бірнеше оңтайлы жобаны жедел таңдау мақсатында қолданыла алады. Қазақстан Республикасының, сондай-ақ әлемнің көптеген қарқынды дамып келе жатқан елдерінің энергетикалық сектор мен өнеркәсіпті декарбонизациялауға қабылдаған бағытын ескерсек, бұл жұмыс айтарлықтай өзекті.
Бұл жұмыста Қазақстандағы АЭС қаржы-экономикалық моделінің компоненттерінің тізімі мен тәсілдері, инвестициялық жобалардың тиімділік өлшемшарттары, жобалардың тәуекелдерін бағалау ұсынылған, сондай-ақ әдістеме валидациясы жүргізілген.

Түйін сөздер: *атом энергетикасы, қаржы-экономикалық модель, NPV, IRR, LCOE.*

AN EXPRESS METHOD FOR CREATION A FINANCIAL AND ECONOMIC MODEL OF PROJECTS IN THE NUCLEAR ENERGY INDUSTRY BASED ON THE EXAMPLE OF INTENTIONS TO CONSTRUCT A NPP IN THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

S. A. Mukeneva*, D. B. Zarva, A. V. Gulkin

National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

** E-mail for contacts: Mukeneva@nnc.kz*

Energy is the basis of successful economic growth and society development in general. However, today Kazakhstan is experiencing a shortage of electricity and, according to forecasts, by 2029 it is expected to have more than 3 GW of electric capacity deficit. The introduction of nuclear generation is a perspective solution of electricity shortage issue. Therefore, the construction of a nuclear power plant (NPP) today is one of the key elements on the agenda of our country. In this regard, there is a need for an in-depth analysis and careful consideration of issues related to the NPP construction including financial planning and implementation.
Financial and economic modeling (FEM) is the most famous tool for forecasting, planning and management in business. Commonly, some analysis of business ideas begins namely with the FEM, and if the assessments show effectiveness of a business project, then a decision is made on detailed review and funding.
It is common practice to construct a fairy complete FEM during feasibility study (FS) of an investment project, when the major design and construction concepts and structural and administrative measures (including financial schemes) have already been defined. Analysis of the model and assessment of financial and economic indicators using FEM allows making a decision on future project developments. In the case of a NPP construction project, where the specific capital costs for the construction of a two-unit station with a total capacity of up to 2.4–2.7 GW are about US$10–15 billion, the financial costs for a feasibility study developing can reach more than US$100 million, and it will take about 3 years to prepare a full feasibility study.
The proposed methodology is an express method for developing the FEM of NPP construction projects, which is sufficiently stable with respect to the statistical inaccuracy of some initial data, to determine the financial efficiency of NPP projects. The developed methodology can be used when comparing a large number of NPP construction projects with different initial data in order to quickly select several optimal ones for their detailed study. This paper is relevant considering the adopted course of the Republic of Kazakhstan, as well as many world's rapidly developing countries, towards decarbonization of the energy sector and industry.

Keywords: *NPP, Technical and economic model, Feasibility study, LCOE, NPV, IRR.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-29-34
УДК 66.45.01

OBTAINING CELLULOSE WITH CRYSTALLOGRAPHIC ORIENTATION OF MACROMOLECULES FROM THE HUSK OF A HYBRID SUNFLOWER

A. A. Imasheva[1,3*], S. K. Kabdrakhmanova[2], K. Akatan[1], Zh. E. Ibraeva[3,4], G. Temirkhanova[3], M. M. Beisebekov[3], N. Kantay[1,3], A. M. Mausumbaeva[5]

[1] S. Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
[2] Satbayev University, Almaty, Kazakhstan
[3] Scientific Center of Composite Materials, Almaty, Kazakhstan
[4] Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan
[5] Zhetysu University, Taldykorgan, Kazakhstan

** E-mail for contacts: imasheva.aidana@list.ru*

Currently, the obtaining and implementation of self-degradable, harmless to the nature of composite materials based on cellulose, allows to solve a number of environmental problems. In this regard, the number of raw materials sources from which cellulose can be obtained increases, the economic and environmental efficiency of its usage and the properties of the obtained cellulose can be studied.

In this study, from sunflower husk (SFH)P63LE10 «Pioneer» (USA) using glacial acetic acid and based on acetic acid with 42% concentration peroxyacetic acid, process of obtaining microcrystalline cellulose comparatively was studied. As a result of the study, based on acetic acid with 42% concentration in combination peroxyacetic acid was determined, that yield of obtained MCC (MCC_2) was 3,7%, and also quantity of α-cellulose was higher to 3,6%. However, the quality of the residual lignin was 24.02%, and the trace quantity of amorphous structure was determined by IR spectroscopy and XRD diffractometry. On the contrary, the yield and quantity of α-cellulose obtained MMC_1 using glacial acetic acid in combination peroxyacetic acid is lower than MMC_2, obtained product was different by high degree of purity and content of the ordered part of cellulose with crystallographic orientation of macromolecules.

Keywords: *sunflower husk (SFH), microcrystalline cellulose (MCC), peroxyacetic acid (PAA), glacial acetic acid, crystallinity.*

INTRODUCTION

Nowadays, as the volume of agriculture increases, so does the amount of waste from that industry, and the problem of its recycling and utilization is becoming urgent [1]. In this regard, the use of rice husks, wheat straw, sunflower seed husks (SFH) and other agricultural wastes as raw materials for obtaining cellulosic materials is intensively studied [2–3]. Since the East Kazakhstan region is in the forefront of sunflower cultivation and sunflower oil production in the republic, the amount of accumulated SFH waste is also quite large [4].

Due to the development of green technologies, there is a growing need to use cellulose to obtain nanocrystals and cellulose nanofibrils from them, which can serve as a potential basis for polymer matrices [5]. Cellulose-based composite materials are used in pharmaceuticals, medicine and electronics, due to such qualities as biodegradability, biocompatibility and low cellular toxicity [6].

In general, since cellulose is a semi-crystalline biopolymer, which contains amorphous and crystalline structures that do not have clear boundaries [7]. The main objectives of the methods for obtaining cellulose are to receive high-quality pure cellulose with a high yield and content of α-cellulose, with less amorphous lignin [8]. The yield and crystallinity of nanocrystals and nanofibers obtained from cellulose depend on the amount of α-cellulose in the cellulose. This is because the form of cellulose with high crystallinity is α-cellulose [9]. Due to the simultaneous process of bleaching and delignification in organosolvent oxidation, it is a more environmentally and cost-effective method for removing lignin during the extraction of cellulose from annual plants [3].

According to the results of the previous research, it was determined that up to 50% cellulosic materials can be obtained from SFH [3, 10]. This is considered a relatively high yield for cellulose from agricultural residues. Whereas, when using the organosolvent method, the yield of cellulose from rice straw and wheat stems is 31.72% and 49–65%, respectively [11].

The waste from the oil extraction plant - sunflower seed husk, which is an indispensable raw material for obtaining cellulose, is often briquetted and used as fuel. In this regard, it is very important to consider the issue of extracting cellulose fibers from sunflower seed husks and develop its effective technology.

Although there are no morphological features of the sunflower seed husk depending on the variety and hybrid type, the size of the husks varies. For example, if the amount of husk in oil varieties and hybrid seeds is 22.5–30%, the amount of husk in confectionery seeds is up to 1.5–2 times more [12]. This, in turn, is a factor that affects the mode of technology for extracting cellulose from it. Currently, sunflower seeds in circulation of the agro-industrial complex of the country are mainly hybrid seeds, so the main source of raw material for cellulose production is sunflowers grown from hybrid seeds. Therefore, the study of extracting cellulose from hybrid seed husks, whose husk size is 1/3 of the seed, is also an urgent issue.

In this study, the work of determining the mode of obtaining microcrystalline cellulose (MCC) by the organosolvent oxidation method using concentrated (glacial acetic acid) and acetic acids whose concentration is reduced by half, i.e. 42%, from the husks of hybrid sunflower seeds "Pioneer 10" grown in the region of East Kazakhstan was conducted. During the experiment, peroxyacetic acids were prepared from glacial acetic and 42% acetic acids in the presence of hydrogen peroxide, and samples of microcrystalline cellulose were obtained. The yield, amount of residual lignin and α-cellulose of the obtained MCC was determined, also its chemical structure by IR-spectroscopic method, as well as its morphology by optical microscopy, and its crystal structure by X-ray phase analysis was determined.

2. EXPERIMENTAL PART

2.1 Materials

P63LE10 "Pioner" (USA) hybrid sunflower seed husk from the circulation of LLP "Mileiko" peasant farm was used to obtain MCC by the of organosolvent oxidation method. This seed has been registered in the State Register of Kazakhstan since 2015, is a hybrid with high fat content and early ripening, mainly grown in East Kazakhstan. The average size of the seeds is 1.1 cm, oval-oblong, the average amount of oil in the seeds is 42.5%, the average amount of husk is 24.3% [13].

In order to prepare SFH, P63LE10 "Pioneer" (USA) hybrid sunflower seed husks were dried at a temperature of 50±20^{0}C to a constant mass in a drying cabinet (CS-80, Belarus).

Peroxyacetic acid was prepared from glacial acetic acid and 42% acetic acid to obtain microcrystalline cellulose by the organosolvent oxidation method and its concentration was determined [14–15]. In order to prepare peroxyacetic acid (PAA) (solvent) glacial acetic acid (CH_3COOH, 99.9%, STST 19814-74), acetic acid (CH_3COOH, 42%, STST 61-75) hydrogen peroxide (H_2O_2, 34,5–36,5%, STST 177-88), sulfuric acid (H_2SO_4, 95–98%, STST 4204-77), distilled water (STST 6709-72) was used. In order to determine qualitative indicators of MCC potassium iodide (KI, chemical pure, Sigma-Aldrich), starch ($(C_6H_{10}O_5)_n$ ACS, Sigma-Aldrich), sodium thiosulfate ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$, 0,1 n, Sigma-Aldrich), drying cabinet (SC-80-01-SPU), orthophosphoric acid (≥85% H_3PO_4), sodium chloride (NaCl, Sigma-Aldrich), sodium hydroxide (NaOH ≥98%) was used. All reagents were used without further purification.

2.3 Methods

2.3.1 Obtaining MCC by the method of organosolvent oxidation

PAA_1 and PAA_2 peroxyacetic acids were developed from glacial acetic acid and 42% acetic acid to obtain microcrystalline cellulose from sunflower seed husks, respectively. The samples MCC_1 and MCC_2 were prepared using PAA_1 and PAA_2 at a ratio of 1/12 g/ml as raw material and solvent hydromodule, respectively. The delignification process was carried out at a temperature of 90±20 °C for 120±1 minutes in a reflux flask with continuous stirring. The obtained gray mass was cooled to a temperature of 25±20 °C, filtered using filter paper and washed with distilled water until the pH medium became neutral (pH=6–7). The neutralized cellulosic mass was dried at a temperature of 70±20 °C for 6 hours to a constant mass. The yield of obtained microcrystalline cellulose was calculated according to Formula 1:

$$X(\%) = (m_{SFH} - m_{MCC}) / m_{SFH} \cdot 100\% \quad (1)$$

where: m_{SFH} – mass of sunflower seed husk, m_{MCC} – mass of obtained MCC.

2.3.2 Determination of qualitative indicators of MCC_1 and MCC_2 samples

The α-cellulose in MCC samples was determined according to STST 6840-78 and the amount of residual lignin was determined according to STST 11960-76.

2.3.3 Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)

FTIR analysis of obtainedMCC_1andMCC_2samples were performed on an FT-801 FTIR spectrometer (Simex, Russia), with a resolution of 1 cm^{-1} and a wavelength 4500–4700 cm^{-1}, at a temperature of 25 °C and a scan rate of 100.

2.3.4 Optical microscope

The surface morphology of the MCC_1 and MCC_2 samples was captured on an optical microscope of the XSZ-146 (China) model at x10 and x40 magnification. The samples were examined under a microscope at a temperature of 25±20 ℃ using a glass.

2.3.5 XRD analysis

The crystal structure of MCC_1 and MCC_2 samples was investigated by X-ray diffraction on an X´PertPRO spectrometer (PANanalytical, Netherlands) using monochromatized copper radiation with a scan step of 0.02°. The measuring angle 10–40°, X-ray tube voltage 40 kV, current 45 mA and measurement time at one point 0.5 s.

3. RESULTS AND DISCUSSION

As a result of the study, light gray MCC_1 and MCC_2 cellulose samples were obtained from P63LE10 "Pioneer" (USA) hybrid sunflower seed husks using PAA_1 and PAA_2 at a ratio of 1/12 of raw material and solvent.

The obtained microcrystalline cellulose yields, α-cellulose and residual lignin content are presented in Table 1. The yield of MCC_1 was 32.8%, while that of MCC_2 was 36.5%. It was found that almost doubling the concentration of acetic acid did not affect the yield of MCC from sunflower husks obtained from hybrid seeds, but on the contrary, the yield of MCC_2 obtained by using 42% acetic acid increased by 3.7%. Accordingly, the content of the pure form of cellulose - α-cellulose, obtained from the inner layer of the plant in the MCC_2 sample was 57%, and compared to MCC_1, its amount was 3.6% higher. It is observed that the amount of residual lignin is 24.02% in the MCC_2 sample, while it is 20.92% less in the MCC_1 sample. Therefore, the use of glacial acetic acid during the organosolvent oxidation process, due to the greater destruction of amorphous structures in sunflower seed husks, a significant part of amphoric substances passes

into the solution and ensures the smooth progress of the delignification process. This is because hydroxonium cations formed by peroxyacetic acids in an acidic environment attack the reaction centers of lignin, the reactivity of lignin increases and it gradually undergoes fragmentation. That is, the more hydroxonium cations are formed, the better the delignification process is [16]. Compared to 42% acetic acid, glacial acetic acid with a higher concentration has a higher ability to form hydroxonium cations during the delignification process, so the residual amorphous structure is destroyed to a greater extent, and the amount of residual lignin in MCC_2 obtained by using acetic acid with twice the concentration is 7.75 times less (Table 1).

Table 1. Qualitative indicators of MCC_1 and MCC_2 samples, %

Qualitative indicators	MCC_1	MCC_2
Yield of MCC	32.80□2	36.50□2
α-cellulose	□.□2	57.00□3
Residual lignin	3.1□0.5	24.02□0.5

From Figure 1 can be seen that the IR spectra of MCC_1 and MCC_2 microcrystalline cellulose samples do not differ from each other. Here, the in-plane skeletal vibrations of the phenolic aromatic ring at wavelengths of 1505–1600 cm^{-1} indicate the presence of lignin [10]. However, the intensity of bands at wavelengths of 1125 cm^{-1} and 1510, 1600, 1659, 1726 cm^{-1}, which are typical models of lignin, in the spectrum of MCC_2 sample may be related to the high content of lignin in MCC_2 sample, as compared to MCC_1.And, between 3337.8 cm^{-1} and 2848.5–2915.4 cm^{-1} absorption interval, the signal of valence vibrations of the −OH group and C–H bond is observed.

If the vibrational signal of the C=C valence double bond in carbon is observed at a wavelength of 1622.4 cm^{-1}, the deformation movement of the CH_2 group can be observed in the range of 1434.3–1361.5 cm^{-1}. The absorption bands and the intensity of functional groups of the MCC molecule obtained from sunflower seed husks in the IR spectrum are similar to the structure of MCC obtained from annual plants in the works of other authors [8].

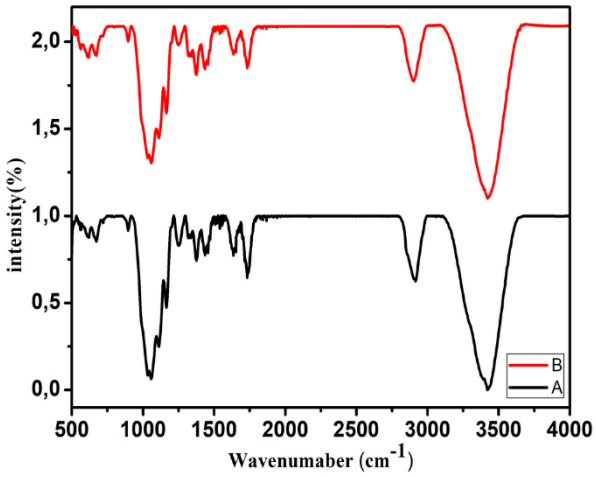


Figure 1. IR spectra of MCC from hybrid sunflower seed husk: A – MCC_2, B – MCC_1

Micrographs of MCC_1 and MCC_2 samples are presented in Figure 2. The structure of the obtained MCC samples is similar to each other and consists of broken and flat fibers of different lengths and widths, with an uneven surface. The average size of the fibers is 224–280 μm in length and 27–32 μm in width for MCC_1 (pictures 2a, b), and 219–285 μm and 29–30 μm for MCC_2, respectively (pictures 2c, d). It can be observed that the concentration of peroxyacetic acid does not affect the morphology and dimensions of MCC fibers obtained from hybrid sunflower seed husk. The morphological dimensions of the obtained MCC fibers are consistent with the results of studies on the extraction of microcrystalline cellulose from sunflower seed husks [8].

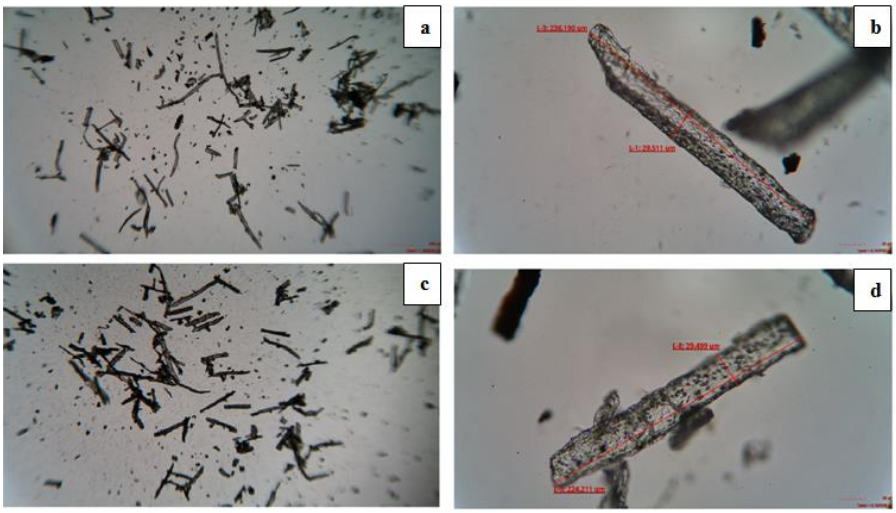


Figure 2. Micrographs of MCC from hybrid sunflower seed husk (with magnification): a) MCC_1x10; b) MCC_1x40; c) MCC_2x10; d) MCC_2x40

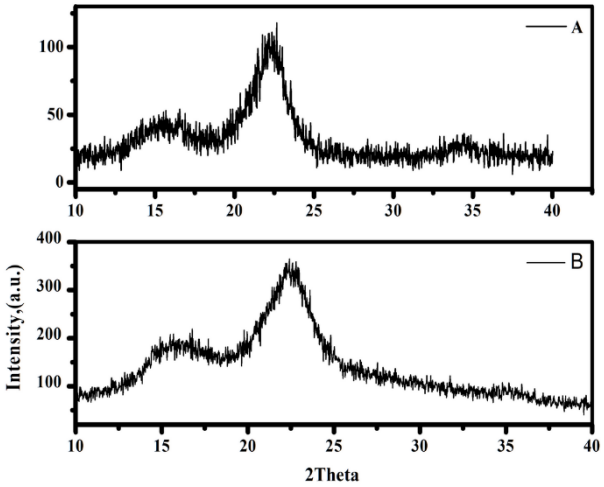


Figure 3. XRD analysis of MCC from hybrid sunflower seed husk: A – MCC_2, B – MCC_1

Intense diffraction peaks 16.81°, 22.25°, 35.78° at 2θ in the X-ray diffraction pattern of MCC_1 and MCC_2 samples indicate that most MCC macromolecules are crystallographically oriented [7, 17]. That is, MCC samples can be conditionally called a crystalline structure. But, unlike MCC_2, the diffractogram of the MCC_1 sample is distinguished by a higher intensity of diffraction peaks (Figure 3).

Therefore, the use of glacial acetic acid in the organosolvent oxidation process reduces the amount of amorphous structure in cellulose and causes an increase in the amount of crystallographically oriented structures.

The amount of residual lignin in MCC_1 and MCC_2 samples obtained by using glacial acetic acid is 7.7 times lower in MCC_1 sample compared to the amount of lignin in MCC_2 obtained using 42% acetic acid, which is an additional evidence of a significant reduction of the amorphous part. The results obtained are in good agreement with previous studies [2–3, 18].

CONCLUSION

Microcrystalline cellulose samples MCC_1 and MCC_2 were obtained from P63LE10 "Pioneer" (USA) hybrid sunflower seed husks by the organosolvent oxidation method using glacial acetic and 42% acetic acids in a 1/12 ratio of raw material and solvent. The yield of the MCC_1 sample was 32.80%, and the amount of α-cellulose was 53.4%, the yield of the MCC_2 sample was 3.7% higher than MCC_1, and the amount of α-cellulose was 3.6% higher, respectively. The amount of residual lignin in the obtained MCC samples was equal to 3.1% for MCC_1 and 24% for MCC_2. This was further confirmed by the X-ray diffractogram results, and it was found that MCC_1 and MCC_2 samples have a crystalline structure, and the MCC_1 sample has a significantly higher crystalline area. Although the chemical structure of the samples was similar according to the IR spectrum, it was observed that the lignin signals were more intense for the MCC_2 sample compared to the MCC_1 sample. It was known that the fibers of MCC samples are similar in size, that is, their length is 219–285 μm, and their width is 27–32 μm.

In conclusion, the use of glacial acetic acid in the production of MCC by organosolvent oxidation of P63LE10 "Pioneer" (USA) hybrid sunflower seed husks allows the development of MCC with a low amount of residual lignin and a crystalline structure.

That is, in the delignification process, glacial acetic acid fragments more amorphous particles than 42% acetic acid, and as a result of the effect on their transition to the melting solution, MCC with a large number of crystallographically oriented parts is obtained. Therefore, the concentration of acetic acid used in the production of MCC by the organosolvent method is an important factor directly affecting the yield and quality of the resulting cellulose.

However, the use of 42% acetic acid is effective in obtaining high-yield microcrystalline cellulose in an environmentally and economically optimal way.

Acknowledgement

This research has been funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP19677542).

REFERENCES

1. https://www.agbz.ru/articles/utilizatsiya-otkhodov-selskogo-khozyaystva
2. Zaitseva L. A., Volkova V. V., Minevich I. E. Preparation of a cellulose product from hemp husks // Polzunov Bulletin. – 2023. – No. 2. – P. 174–183. (In Russ.)
3. K. Akatan, S. Kabdrakhmanova, T. Kuanyshbekov, Z. Ibraeva, A. Battalova, K.S. Joshy, Sabu Thomas. Highly-efficient isolation of microcrystalline cellulose and nanocellulose from sunflower seed waste via environmentally benign method // Cellulose 29(7). – May 2022. https://doi.org/10.1007/s10570-022-04527-4
4. https://bossagro.kz/26389-vko-zanimaet-1-mesto-po-proizvodstvu-semyan-podsolnechnika
5. Kurniawan Tjhang Winny, Sulistyarti Hermin, Rumhayati Barlah, Sabarudin Akhmad. Cellulose Nanocrystals (CNCs) and Cellulose Nanofibers (CNFs) as Adsorbents of Heavy Metal Ions // Journal of Chemistry. – 2023. – ID5037027. – 36 pages. https://doi.org/10.1155/2023/5037027
6. Teng, C.P.; Tan, M.Y.; Toh, J.P.W.; Lim, Q.F.; Wang, X.; Ponsford, D.; Lin, E.M.J.; Thitsartarn, W.; Tee, S.Y. Advances in Cellulose-Based Composites for Energy Applications // Materials. – 2023. – Vol. 16. – P. 3856. https://doi.org/10.3390/ma16103856
7. Ye, D., Rongpipi, S., Kiemle, S.N. et al. Preferred crystallographic orientation of cellulose in plant primary cell walls // Nat Commun. – 2020. – Vol. 11. – P. 4720. https://doi.org/10.1155/2023/5037027
8. A.K. Battalova, S.K. Kabdrakhmanova, K. Akatan, M.M. Beisebekov, N. Kantay, Zh.E. Ibraeva, A.M. Mausumbayeva, L.B. Merck. Features of microcrystalline cellulose produced from sunflower seeds of different oil content // International Journal of Biology and Chemistry. – 2023. – Vol. 16. – No. 1. https://doi.org/10.26577/ijbch.2023.v16.i1.08

9. Hamid M. Shaikh; Arfat Anis; Anesh Manjaly Poulose; Saeed M. Al-Zahrani; Niyaz Ahamad Madhar; Abdullah Alhamidi; Mohammad Asif Alam. Isolation and Characterization of Alpha and Nanocrystalline Cellulose from Date Palm (Phoenix dactylifera L.) // Trunk Mesh. Polymers. – 2021. https://doi.org/10.3390/polym13111893
10. A.A. Imasheva, S.K. Kabdrakhmanova, Zh.E. Ibraeva, S.E. Kudaibergenov, K. Akatan, M.B. Abilev. Investigation of the possibility of obtaining cellulose from oily crop residues by the organosolvent method // Bulletin NNC RK. – Issue 1, March, 2020. – P. 35–39. (in Kazakh)
11. Pen R. Z., Shapiro I. L., Karetnikova N. V. Peroxide cellulose from wheat straw // Chemistry of plant raw materials, – 2022. – No. 2. – P. 299–305. URL: http://journal.asu.ru/cw/article/view/10688. (In Russ.)
12. S.B. Khusid, A.N.Gneush, E.V. Nesterenko Sunflower husks as a source of functional feed additives // Scientific Journal of KubGAU. – 2015. – No. 107 (03). (In Russ.)
13. https://gcomsort.kz
14. A.V. Vurasko, A.R. Minakova, B.N. Driker, V.P. Sivakov, A.M. Kosacheva. Technology for producing cellulose from non-wood plant raw materials // Chemistry of plant raw materials. – 2010. – No. 2. – P. 165–168. (In Russ.)
15. A.V. Vurasko, E.I. Simonova, A.R. Minakova, V.P. Sivakov. Improving the technology for producing cellulose by the oxidative-organosolvent method from non-wood plant raw materials // Chemistry of plant raw materials. – 2019. – No. 3. – P. 269–276. (In Russ.)
16. Hyeong Rae Lee, Romas J Kazlauskas, Tai Hyun Park. One-step pretreatment of yellow poplar biomass using peracetic acid to enhance enzymatic digestibility // Scientific Reports /7:12216. https://doi.org/10.1038/s41598-017-12542-w
17. O.T. Shipina., Z.T. Valishina., A.V. Kostochko. X-ray diffraction analysis of various types of cellulose // Bulletin of the Technological University. – 2015. – Vol. 18. – No. 7. (In Russ.)
18. O.K. Nugmanov, N.P. Grigorieva, N.A. Lebedev. Structural analysis of herbal cellulose // Chemistry of plant raw materials. – 2013. – No. 1. – P. 29–37. (In Russ.)

ГИБРИДТІК СҰРЫПТЫ КҮНБАҒЫС ТҰҚЫМЫ ҚАУЫЗЫНАН КРИСТАЛЛОГРАФИЯЛЫҚ БАҒДАРЛАНҒАН МАКРОМОЛЕКУЛАЛЫ ЦЕЛЛЮЛОЗА АЛУ

А. А. Имашева[1,3*], С. Қ. Қабдрахманова [2], Қ. Ақатан[1], Ж. Е. Ибраева[3,4], Г. Темирханова[3], М. М. Бейсебеков[3], Н. Қантай[1,3], А. М. Маусымбаева[5]

[1] С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен, Қазақстан
[2] Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан
3 Композиттік материалдар ғылыми орталығы, Алматы, Қазақстан
[4] Абай атындағы Қазақ Ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан
[5] І. Жансүгіров атындағы Жетісу университеті, Талдықорған, Қазақстан

** Байланыс үшін E-mail: imasheva.aidana@list.ru*

Қазіргі таңда, целлюлоза негізіндегі өздігінен ыдырайтын, табиғатқа зиян келтірмейтін композиттік материалдарды алу және оны қолданысқа енгізу – бірқатар экологиялық мәселелерді шешуге мүмкіндік беруде. Осыған байланысты, целлюлоза алуға болатын шикізат көздерінің қатары көбейіп, оларды қолдануда экономикалық және экологиялық тиімділігі, алынатын целлюлозаның қасиеттері кеңінен зерттелуде.

Жұмыста, P63LE10 «Пионер» (США) күнбағыс тұқымы қауызынан мұзды сірке қышқылы мен концентрациясы екі есеге төмендетілген 42%-дық сірке қышқылы негізінде алынған пероксисірке қышқылдарын салыстырмалы түрде қолдана отырып, микрокристалды целлюлоза алу процесі зерттелді. Зерттеу нәтижесінде концентрациясы екі есе төмен сірке қышқылы қолданылған пероксисірке қышқылы қатысында алынған МКЦ-ның ($МКЦ_2$) шығымы 3,7%-ға, ал құрамындағы α-целлюлоза мөлшері 3,6%-ға жоғары болатындығы анықталды. Дегенмен, ондағы қалдық лигниннің мөлшері 24,02% тең болып, аморфты құрылым іздері (следовые количество аморфных структур) ИҚ-спектроскопия және XRD дифрактограммасы арқылы анықталды. Керісінше, мұзды сірке қышқылы негізінде алынған пероксисірке қышқылын қолдану арқылы алынған $МКЦ_1$ шығымы мен құрамындағы α-целлюлоза мөлшері $МКЦ_2$ салыстырғанда аздау болғанымен, алынған өнім макромолекулалардың кристаллографиялық бағдары бар целлюлозаның реттелген бөлігінің жоғары мөлшерімен және жоғары тазалық дәрежесімен ерекшеленеді.

Кілт сөздер: *күнбағыс тұқымы қабығы (SFH), микрокристалды целлюлоза (МКЦ), еріткіш, пероксисірке қышқылы (PAA), мұзды сірке қышқылы, α-целлюлоза, қалдық лигнин, кристалдылық.*

ПОЛУЧЕНИЕ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ С КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ МАКРОМОЛЕКУЛ ИЗ ЛУЗГИ ГИБРИДНОГО СОРТА ПОДСОЛНЕЧНИКА

А. А. Имашева[1,3*], С. К. Кабдрахманова[2], К. Акатан[1], Ж. Е. Ибраева[3,4], Г. Темирханова[3], М. М. Бейсебеков[3], Н. Кантай[1,3], А. М. Маусымбаева[5]

[1] Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан
[2] Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатбаева, Алматы, Казахстан
[3] Научный центр композитных материалов, Алматы, Казахстан
[4] Казахский национальный педагогический университеті им. Абая, Алматы, Казахстан
[5] Жетысуский университет им. И. Жансугурова, Талдыкурган, Казахстан

** E-mail для контактов: imasheva.aidana@list.ru*

В настоящее время получение и внедрение к применению биоразлагающихся композиционных материалов на основе целлюлозы, не наносящих вреда природе, позволяют решить ряд экологических проблем. В связи с этим увеличивается количество сырья, из которого можно получить целлюлозу, широко изучаются экономическая и экологическая эффективность его использования и свойства получаемой целлюлозы.

В работе изучен процесс получения микрокристаллической целлюлозы из лузги семян подсолнечника P63LE10 «Pioneer» (США) с использованием пероксиуксусных кислот на основе ледяной уксусной кислоты и 42%-ной уксусной кислоты с уменьшенной в два раза концентрацией. В результате исследования установлено, что выход МКЦ ($МКЦ_2$), полученной в присутствии пероксиуксусной кислоты при вдвое меньшей концентрации уксусной кислоты, выше на 3,7%, а содержание α-целлюлозы – выше на 3,6%. Однако количество остаточного лигнина в нем равно 24,02%, следы аморфной структуры (следовые количества аморфных структур) определены методами ИК-спектроскопии и рентгенодифрактограммы. Напротив, хотя выход и содержание α-целлюлозы $МКЦ_1$, полученного с использованием пероксиуксусной кислоты на основе ледяной уксусной кислоты, ниже, чем у $МКЦ_2$, но полученный продукт характеризуется высокой степенью чистоты и высоким содержанием упорядоченных частей целлюлозы с кристаллографической ориентацией макромолекул.

***Ключевые слова**: лузга подсолнечника (SFH), микрокристаллическая целлюлоза (МКЦ), растворитель, пероксиуксусная кислота (PAA), ледяная уксусная кислота, α-целлюлоза, остаточный лигнин, кристалличность.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-35-43
УДК 539.21: 539.12.04: 669.3

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТОЙКОСТЬ К ПИТИНГОВОЙ КОРРОЗИИ ОБЛУЧЕННОЙ НЕЙТРОНАМИ СТАЛИ AISI 316 LN

Д. А. Мережко*, А. М. Такиева, М. С. Мережко

РГП «Институт ядерной физики» МЭ РК, Алматы, Казахстан

** E-mail для контактов: diana@inp.kz*

В данной работе было исследовано влияние легирующих элементов (азота, марганца, меди и вольфрама), и нейтронного облучения в реакторе ВВР-К до максимального флюенса $2 \cdot 10^{20}$ н/см^2 на стойкость к питтинговой коррозии аустенитной стали AISI 316 LN, подвергнутой провоцирующим нагревам при температурах в диапазоне 500–800 °С. Установлено, что легирование азотом и марганцем значительно улучшает коррозионные свойства стали AISI 316 LN, а добавление меди и вольфрама снижает стойкость к питтинговой коррозии. Показано, что провоцирующие нагревы при температурах от 500 до 800 °С с интервалом 100 °С ухудшают коррозионную стойкость сталей в необлученном состоянии в следствие образования нитридов и карбидов хрома, а добавление меди уменьшает степень сенсибилизации. Согласно полученным результатам установлено, что облучение нейтронами до максимального флюенса $2 \cdot 10^{20}$ н/см^2 исследуемых сталей после холодной прокатки и не подвергавшихся провоцирующим нагревам привело к уменьшению скорости коррозии. Провоцирующие нагревы при температурах 700-800 °С облученных нейтронами образцов сталей 211 L-213 L привели к увеличению скорости коррозии в особенности в сталях, легированных медью. Нейтронное облучение в значительной степени усиливает эффект сенсибилизации.

Ключевые слова: *азотистые стали, нейтронное облучение, легирование, сенсибилизация, питтинговая коррозия.*

Введение

Аустенитные стали обладают превосходной стойкостью к коррозии благодаря образованию на поверхности стали очень тонкой оксидной пленки [1]. Нарушение целостности этой пленки, например, вследствие контакта с агрессивной средой, либо при физическом или механическом воздействии приводит к развитию питинговой (точечной) коррозии. Питтинговая коррозия – важный и опасный тип локализованной коррозии. Стойкость аустенитных и феррито-мартенситных сталей к питтинговой коррозии во многом определяется химическим составом воды в активной зоне водо-водяных реакторов и бассейнах выдержки быстрых реакторов. Несмотря на то, что содержание ионов хлора в воде регламентируется и контролируется достаточно строго, в отдельных аварийных ситуациях возможно кратное ее превышение [2]. В таком случае глубокие язвенные повреждения могут привести к нарушению целостности конструкций и, как следствие, радиационным авариям. Снижение стойкости аустенитных сталей к питтинговой и межкристаллитной коррозии после нейтронного облучения является одной из ключевых проблем радиационного материаловедения, влияющих на безопасность ядерных установок в аварийных ситуациях. Создание высоколегированных технологичных сталей, стойких к питтинговой коррозии в облученном нейтронами состоянии, рассматривается как один из способов решения этой проблемы и позволяет улучшить безопасность существующих и будущих ядерных реакторов.

Стойкость к питтинговой коррозии зависит от материала (химического состава стали, термической обработки, размера зерна, сенсибилизации и других металлургических параметров) и окружающей среды. Точечная коррозия в основном возникает на поверхностно-активных участках, таких как включения или любые места с уменьшенной пассивной пленкой, например, в зонах, обедненных хромом [3]. Один из возможных путей повышения стойкости к питтинговой коррозии – изменение химического состава стали.

Одним из способов повышения устойчивости к точечной коррозии является легирование определенными элементами. Добавка меди повышает общую коррозионную стойкость нержавеющих сталей в сернокислых средах [4], стабилизирует аустенит [5], улучшает деформируемость сплавов. Имеется много данных о локализованной коррозии сталей, легированных медью [6], однако не существует общепринятого общего взгляда на однократное влияние меди на коррозионное поведение, особенно на питтинговую и щелевую коррозию. В литературе широко исследовано влияние других элементов, таких как марганец, молибден, кремний, алюминий и некоторых других, на механические свойства сталей [7–9]. В частности, легирование вольфрамом способствует упрочнению твердого раствора, повышению прочностных свойств стали [10]. Легирование марганцем увеличивает растворимость азота, расширяет аустенитную область, приводит к снижению образования нитридов при одновременно укрупнении фазы $Cr_{23}C_6$ [11]. При этом следует отметить высокую токсичность марганца, а также негативное влияние марганца на сопротивление питтингообразованию [9].

Нержавеющие стали, легированные азотом, обладают одновременно высокой прочностью, пластичностью, коррозионной стойкостью и устойчивой (стабильной) аустенитной структурой в широком интервале температур [12]. Получение достаточно высоких прочностных характеристик при легировании стали азотом позволяет отказаться от дорогостоящих легирующих элементов (Ni, Mo). Показано, что легирование азотом (иногда с добавкой марганца) приводит к улучшению коррозионной стойкости аустенитных сталей, способствует снижению к межкристаллитной и точечной коррозии в следствие обогащения пассивирующей пленки хромом [13–16]. Легирование азотом также повышает уровень прочности [15], улучшает характеристики деформационного упрочнения и повышает устойчивость аустенита при охлаждении и пластической деформации [17, 18]. Однако технологические сложности, связанные с внедрением и удержанием азота в матрице при выплавке и кристаллизации слитка, ограничивают распространение азотистых сталей в промышленности.

Склонность к коррозии возрастает после небольшой выдержки стали в области температур, в которой происходит образование и рост карбидов вблизи границ зерен. Для аустенитных сталей этот диапазон находится в пределах 550–800 °C [19–20]. В этом диапазоне температур углерод диффундирует к границам зерен и образует богатые хромом карбиды типа $M_{23}C_6$, образуя на границе между карбидами области, обедненные Cr. Таким образом, нормальная реакция пассивации ограничивается в этих обедненных Cr областях, и сталь становится подверженной межкристаллитной коррозии. Помимо карбидов в аустенитных сталях могут образовываться нитриды хрома типа Cr_2N и σ-фаза, которые также приводят к истощению Cr на границах зерен, что обеспечивает предпочтительные места для образования коррозионных язв [21, 22]. Это явление называется сенсибилизация, или сенситизация (в зарубежных источниках), и может встречаться во время неправильной термической обработки или сварки [23]. Однако при увеличении времени выдержки или повышении температуры эффект сенсибилизации исчезает в результате диффузии атомов хрома на границы зерен в обедненные хромом зоны.

Цель настоящей работы: исследовать влияние легирования азотом, марганцем, медью, вольфрамом, термической обработки и нейтронного облучения до максимального флюенса $2 \cdot 10^{20}$ н/см^2 на устойчивость к питтинговой коррозии аустенитной нержавеющей стали AISI 316 LN.

1. Материалы и методы исследования

В данной работе исследовали нержавеющую хромоникелевую сталь AISI 316 LN, широко используемую в реакторостроении. Данную сталь изготовили путем легирования коммерческой стали AISI 304, в виде 4 плавок с разным химическим составом. Сплавы были отлиты на заводе по производству нержавеющей стали Stainless Foundry and Engineering, Inc. (Милуоки, штат Висконсин, США) с использованием индукционной плавки воздухом с аргоновым газом. Составы исследуемых материалов приведены в таблице 1. Увеличение концентрации марганца и добавление азота проводилось для повышения стабильности аустенита и упрочнения родительской стали AISI 316LN, меди – для улучшения коррозионной стойкости, вольфрама – для увеличения прочности при повышенных температурах. В таблице 1 также приведены рассчитанные величины, определяющие сопротивление питтингообразованию, PREN – Pitting resistance equivalent+N, [24]

$$PREN = \%Cr + 3.3 \cdot \%Mo + 16 \cdot \%N - \cdot 0.5 \cdot \%Mn \quad (1)$$

и стойкость к точечной и щелевой коррозии, MARC – Measure of alloying for resistance to corrosion,

$$MARC = \%Cr + 3.3 \cdot \%Mo + 20 \cdot \%N + 20 \cdot \%C - \\ - \cdot 0.5 \cdot \%Mo - 0.25 \cdot \%Ni. \quad (2)$$

Механико-термическую обработку сталей AISI 316 LN, 211 L, 212 L и 213 L проводили в Оак-Риджской национальной лаборатории (рисунок 1). Заготовки сталей и модификаций 211 L, 212 L и 213 L были выплавлены в виде брусков материала толщиной 40 мм. Для получения однородной структуры осуществляли горячую прокатку по схеме: 15 проходов с обжатием по ~2 мм за проход, итоговое утонение — с 40 до 10 мм. Перед горячей прокаткой бруски отжигали в среде аргона в течение 1 часа при 1200 °C. После каждых двух проходов материал отжигали в течение 10 минут при той же температуре. Методом холодной прокатки толщина листа была дополнительно уменьшена до 7 мм. Достигнутая при этом степень обжатия составила ~30%, размер зерна ~20 мкм.

Таблица 1. Химический состав стали (вес %) и рассчитанные величины PREN и MARC AISI 316 LN и ее модификаций 211 L, 212 L, 213 L

Материал	Fe	C	Si	Mo	Cr	Mn	Ni	Cu	N	W	PREN	MARC
316 LN	Осн.	0,03	0,5	2,5	17,5	1,8	12,5	0,3	0,07	0	26,0	23,7
211 L	Осн.	0,02	0,44	2,5	17,7	4,1	12,5	0,31	0,34	0	29,3	28,0
212 L	Осн.	0,01	0,44	2,5	17,7	5,1	12,6	2,8	0,36	0	29,2	27,7
213 L	Осн.	0,01	0,45	2,5	17,7	5,1	12,6	2,8	0,32	1	28,5	26,9

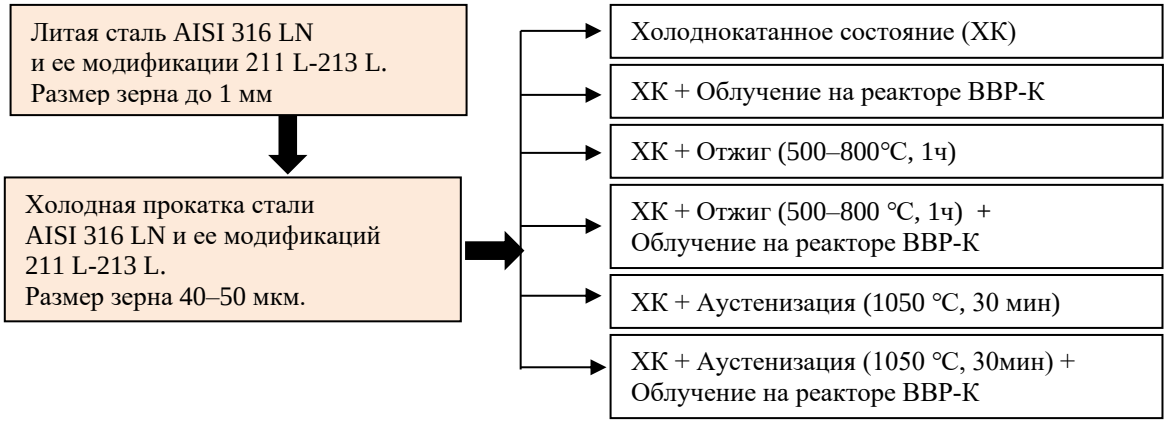


Рисунок 1. Карта исследуемых состояний стали AISI 316 LN и ее модификаций: сталей 211 L – 213 L

Образцы для коррозионных испытаний были изготовлены в лаборатории радиационного материаловедения Института ядерной физики. Для вырезки образцов использовались прецизионный отрезной станок Buehler IsoMet и электроискровой режущий станок ДГТ-ЭП-03. После вырезки все образцы подвергались механической шлифовке с помощью шлифовальной бумаги для обеспечения равномерной поверхности и удаления дефектов, которые могли бы повлиять на результаты испытаний. Затем образцы были пронумерованы с помощью набора клейм для маркировки по металлу.

Часть образцов подвергали термической обработке: провоцирующим нагревам и аустенизирующему отжигу. Провоцирующие нагревы с целью стимулирования выделения карбидов и по границам зерен проводили при температурах от 500 до 800 °С с интервалом 100 °С в вакуумной трубке (<1 Па), время выдержки 1 час при каждой температуре. После этого образцы в трубке под вакуумом охлаждали в воде комнатной температуры. Температура и время старения выбраны таким образом, чтобы моделировать процесс сварки стали без надлежащей послесварочной термообработки, так как при сварке в зоне термического влияния может возникнуть кратковременный нагрев до 500–800 °С. Кроме того, подобные температуры могут возникнуть в активной зоне ядерного реактора в аварийных условиях. Аустенизирующий отжиг проводили для релаксации внутренних напряжений, возникших в материале в процессе холодной деформации при прокатке. Холоднокатаные образцы отжигали при температуре 1050 °С в течение 30 мин в вакуумной трубке.

Образцы исследовали в необлученном состоянии и после облучения нейтронами в центральном канале на реакторе ВВР-К, температура облучения не выше 80 °С. Исследуемые флюенсы тепловых нейтронов составляют 2×10^{18}, 5×10^{18}, 2×10^{19} и 2×10^{20} н/см^2, что соответствует накопленным флюенсам быстрых нейтронов 3×10^{17}, 9×10^{17}, 3×10^{18} и 7×10^{19} н/см^2, соответственно.

Испытание на питтинговую коррозию проводили по методике ускоренных испытаний в соответствии с международным стандартом ASTM G 48-03, метод А [25]. Метод заключается в выдерживании образцов в течение 5, 24, 48 и 72 часов при постоянной температуре в 10% водном растворе трихлорида железа ($FeCl_3\times6H_2O$) с последующим определением потери массы образцов. Для испытаний применялись плоские образцы размерами ~10×6×2 мм. Перед испытаниями поверхность исследуемых образцов шлифовали с помощью шлифовальной бумаги с последовательно убывающей величиной зерна до 0,8–1 мкм. Образцы промывали в проточной воде, обезжиривали спиртом, ополаскивали дистиллированной водой и высушивали в струе воздуха. Перед испытаниями измеряли геометрические размеры образцов с помощью толщиномера «Sony» (Япония) с погрешностью ±1 мкм. Массу определяли на электронных аналитических весах KERN-770 с точностью 0,0001 г. Для создания агрессивной коррозионной среды использовали 10% водный раствор железа треххлористого 6-водного ($FeCl_3\times6H_2O$). Раствор готовили минимум за 2 часа до начала эксперимента и хранили в закрытой посуде. Для приготовления раствора смешивали 100 г кристаллогидрата соли и 900 мл дистиллированной воды и измеряли плотность полученного раствора при температуре 20 °С. Плотность раствора доводили до 1,049 г/см^3.

Испытания проводились в стеклянных сосудах объемом 100 мл при температуре 20±2 °С. После каждого промежутка времени образцы доставали из раствора, промывали в струе водопроводной воды, очищали от продуктов коррозии с помощью ультразвуковой ванны, промывали дистиллированной водой, обезжиривали этиловым спиртом, затем высушивали в струе воздуха, проводили взвешивание и фотографирование с помощью USB-микроскопа.

Оценку коррозионной стойкости осуществляли по весовому показателю скорости коррозии k (г/м^{2}ч)

$$k = \frac{\Delta m}{S\tau} \quad (3)$$

и глубинному покателю скорости коррозии (мм/год)

$$K_{П} = \frac{8,76\Delta m}{S\tau\rho} \quad (4)$$

где Δm – потеря массы металла, S – площадь поверхности образца, τ – время, ρ – плотность. Измерение плотности проводили с методом гидростатического взвешивания.

2. Результаты и обсуждение

В таблице 2 приведены измеренные значения плотности исследуемых материалов. Полученные значения использовались для расчета коррозионной повреждаемости.

Таблица 2. Плотность исследуемых азотистых сталей на основе AISI 316 LN в состоянии поставки и после термической обработки

Сталь	Состояние поставки	Режимы термической обработки				
		500 °C, 1 ч	600 °C, 1 ч	700 °C, 1 ч	800 °C, 1 ч	1050 °C, 30 мин
316 LN	7,96	7,93	7,94	7,92	7,95	7,97
211 L	7,92	7,92	7,93	7,95	7,93	7,92
212 L	7,89	7,91	7,90	7,91	7,94	7,90
213 L	7,93	7,97	7,97	7,97	7,95	7,97

Образцы сталей для коррозионных испытаний вырезались по направлению прокатки после предварительной холодной деформации с обжатием 30%. В результате пластической деформации в зонах, нагруженных выше предела текучести, в структуре наблюдаются множественные фигуры деформации (рисунок 2, а). Согласно [26], эти фигуры деформации обусловлены сегрегацией нитрида железа в участках зерен, содержащих дефекты кристаллической решетки. Обогащение нитридами приводит к гетерогенности участков, локально деформированных выше предела текучести, что, в свою очередь, обуславливает более интенсивное их травление при использовании раствора хлорного железа.

В холоднокатанных образцах отмечается значительная вытянутость зерен в направлении прокатки, которая устраняется в результате перекристаллизации при аустенизации. В результате структура становится более изотропной (рисунок 2, б).

В результате коррозионных испытаний в 10% водном растворе трихлорида железа было установлено, что анизотропия структуры исследуемых холоднокатанных сталей обуславливает значительное различие в коррозионной стойкости в направлениях вдоль и поперек прокатки (рисунок 3). Так, в образце стали 213 L в состоянии поставки после выдержки 72 ч в коррозионном растворе степень поражения коррозионными язвами в плоскости поперек прокатки составляет 30–45%, а в плоскости вдоль прокатки – 4–8%. Плоскость поперек направления прокатки наиболее подвержена питтинговой и межкристаллитной коррозии. Высокий уровень внутренних сжимающих напряжений в структуре материала создает благоприятные условия для развития межкристаллитной коррозии, что в отдельных участках образца приводит к выпадению зерен и формированию обширных язвенных образований. В то время как на поверхности вдоль направления прокатки формируются лишь неглубокие единичные питтинги.



а)



б)

Рисунок 2. Структура холоднокатанной стали AISI 316 LN (а) и после аустенизирующего отжига при 1050 °C в течение 30 мин (б)

Аустенизирующий отжиг при температуре 1050 °C в течение 30 минут приводит к рекристаллизации стали и устранению анизотропии структуры. В результате чего коррозионная стойкость образцов не зависит от направления прокатки. Образующиеся в результате выдержки в коррозионном растворе питтинги равномерно покрывают все поверхности образца.

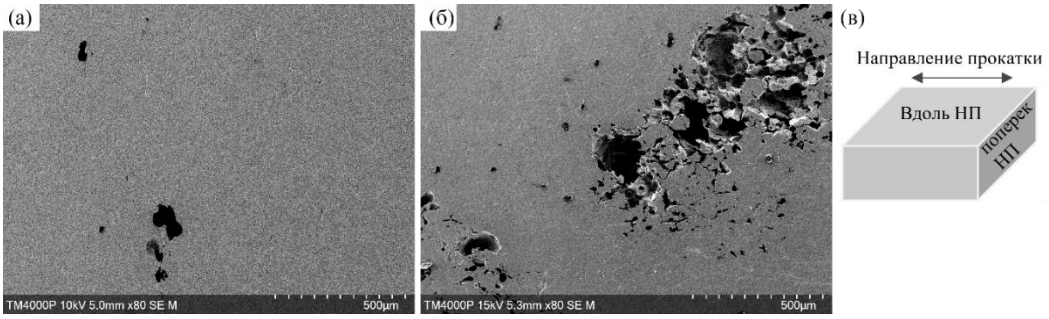


Рисунок 3. Коррозионные повреждения на образце холоднокатанной стали 213L в направлениях вдоль (а) и поперек (б) прокатки в соответствии со схемой образца (в)

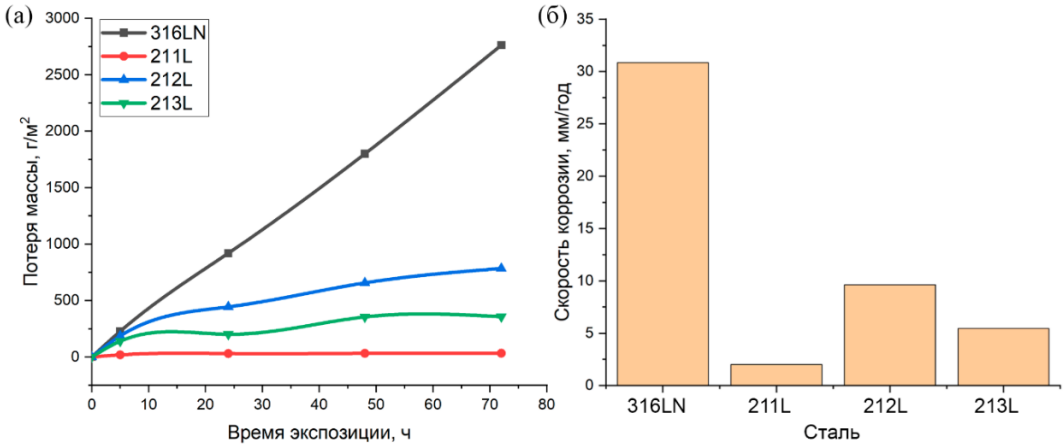


Рисунок 4. Зависимость потерь массы от времени экспозиции (а) и глубинный показатель скорости коррозии (б) стали 316 LN и модифицированных сталей на ее основе

2.1 Влияние химического состава

Как видно из представленных данных (рисунок 4) родительская сталь AISI 316 LN в состоянии поставки обладает худшей стойкостью к питтинговой коррозии по сравнению с модифицированными сталями. Испытания показали, что данная сталь после легирования азотом и марганцем (сталь 211 L) показала значительно более высокую стойкость к питтинговой коррозии после выдержки в течение 72 часов в агрессивном растворе $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ при комнатной температуре.

Анализ кинетики потери массы исследуемых сталей показал, что образцы наиболее интенсивная потеря массы наблюдается в первые 5 часов. После этого скорость потери массы модифицированных сталей значительно снижается, в то время как в стали 316LN сохраняется линейная зависимость потери массы от времени выдержки.

Согласно десятибалльной шкале коррозионной стойкости металлов (по ГОСТ 13819–84), стали 316 LN и 212 L имеют 10 баллов и относятся к группе нестойких к питтинговой коррозии сталей, 211 L и 213 L имеют 8 и 9 баллов, соответственно, и относятся к группе малостойких сталей.

Представленные данные явно свидетельствуют о положительном влиянии азота и негативном воздействии меди на коррозионную стойкость стали к питтинговой коррозии.

2.2 Влияние термической обработки

Результаты испытаний в хлоридной среде образцов исследуемых сталей после аустенизации и провоцирующих нагревов в диапазоне температур 500–800 °С представлены в таблице 3.

Установлено, что аустенизирующий отжиг является эффективным методом повышения коррозионной стойкости холоднокатанных сталей. Уменьшение скорости коррозии в 2–3 раза по сравнению с исходным состоянием обусловлено релаксацией внутренних напряжений в деформированных зернах и, соответственно, фигур деформации (рисунок 2, б), а также повышению растворимости азота при аустенизации.

Скорость коррозии образцов сталей, подвергнутых провоцирующим нагревам, зависит от температуры. Для родительской стали 316 LN термическая обработка при 500–600 °С в течение 1 ч приводит к увеличению коррозионной стойкости вследствие частичной релаксации внутренних напряжений, возникших при прокатке стали. Увеличение температуры провоцирующего нагрева до 700 и 800 °С сопровождается двумя конкурирующими процессами: снижение внутренних напряжений, способствующее повышению коррозионной стойкости, и образование

карбидов и нитридов хрома, негативным образом влияющих на стойкость к локальной коррозии. Однако поскольку содержание углерода и азота в этой стали невелико, то количественно скорость коррозии в состоянии поставки и после отпуска при 700 °С одинакова и составляет ~31 мм/год.

В сталях 211 L-213 L после выдержки при температурах 500–600 °С скорость коррозии снижается также, как и в стали 316 LN. Увеличение температуры провоцирующих нагревов до 700 и 800 °С вызывает значительное увеличение скорости коррозии: в 2 раза у сталей, легированных медью и вольфрамом и в ~4 раза у стали 211 L, легированной азотом. Скорость коррозии при этом достигает ~15 мм/год для всех модифицированных сталей. Содержание углерода в модифицированных сталях составляет 0,01…0,03%. Поэтому после выдержки образцов стали в течение 1 часа при 700 и 800 °С не происходит значительного обеднения границ зерен хромом в следствие образования карбидов, содержащих 70–80% хрома, и коррозионные повреждения в исследуемых азотистых сталях в большей степени обусловлены иными причинами. Вероятно, межкристаллитная коррозия в модифицированных сталях 211 L-213 L развивается в основном за счет образования нитридов хрома Cr_2N, а добавление меди уменьшает степень сенсибилизации.

Таблица 3. Глубинный покатель скорости коррозии сталей 316 LN и 211 L-213 L после аустенизирующего отжига и провоцирующих нагревов

Сталь	Глубинный покатель скорости коррозии, мм/год					
	Состояние поставки	Режимы термической обработки				
		500 °С, 1 ч	600 °С, 1 ч	700 °С, 1 ч	800 °С, 1 ч	1050 °С, 30 мин
316 LN CR	30,85	21,81	18,58	31,37	17,84	10,83
211 L CR	2,02	2,10	5,41	14,98	7,66	1,00
212 L CR	9,62	5,62	4,00	11,94	15,34	3,47
213 L CR	5,45	3,56	0,16	15,62	10,38	2,29

2.3 Влияние нейтронного облучения

Облучение нейтронами до максимального флюенса $2 \cdot 10^{20}$ н/см^2 исследуемых сталей после холодной прокатки привело к уменьшению скорости коррозии. Вероятно это произошло вследствие релаксации напряжений при нейтронном облучении. Данный факт подтверждается литературными данными [27].

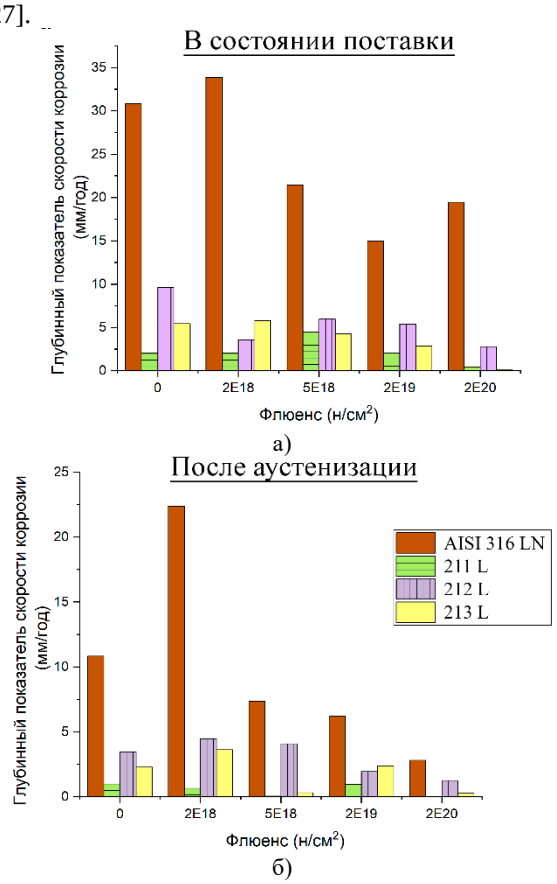


Рисунок 5. Дозовая зависимость глубинного показателя скорости коррозии стали 316 LN и модифицированных сталей на ее основе после холодной прокатки (а) и аустенизирующего отжига (б)

2.4 Влияние термической обработки и последующего нейтронного облучения

Стойкость к питтинговой коррозии исследуемых материалов значительно снижается после повоцирующих нагревов при температурах 700–800 °С (рисунок 6). Этот эффект особенно ярко выражен у сталей легированных медью. Нейтронное облучение в значительной степени (в 2–3 раза при небольших повреждающих дозах и до 10 раз при максимальном флюенсе нейтронов) усиливает эффект сенсибилизации.

Интересным является случай стали AISI 316 LN, не подвергнутой легированию. В этой стали максимум сенсибилизации приходится на температуры 600–700 °С, а облучение, в особенности небольшими флюенсами нейтронов даже несколько улучшает коррозионную стойкость материала.

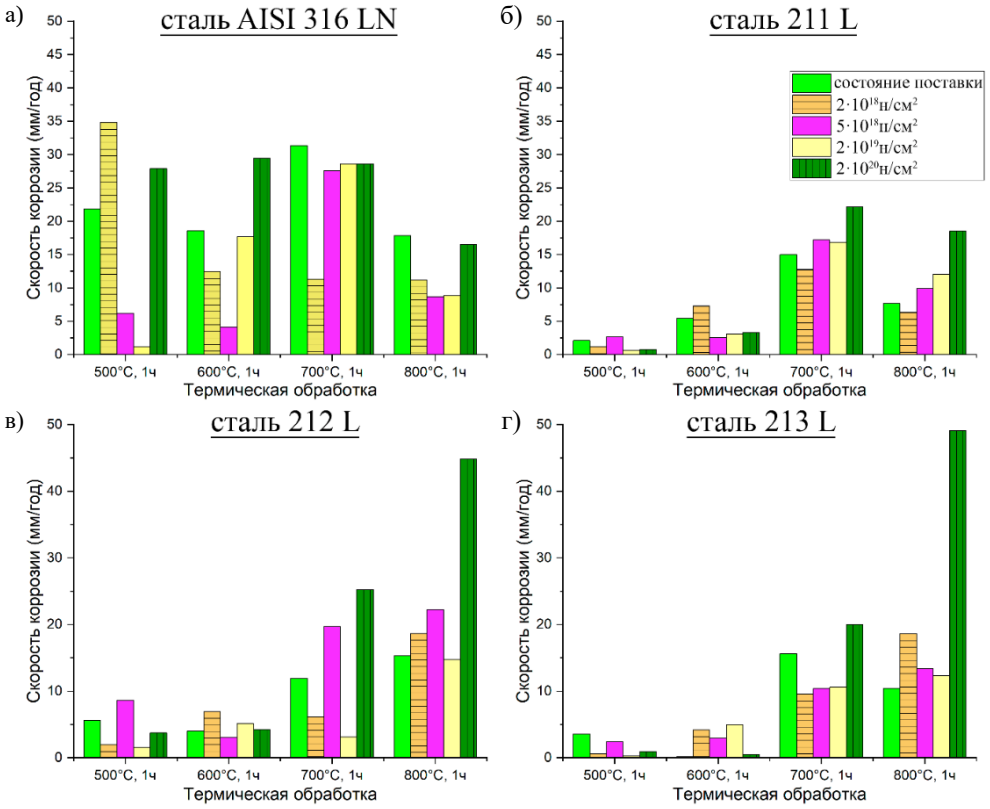


Рисунок 6. Влияние провоцирующих нагревов в диапазоне температур 500–800 °С, 1 ч и нейтронного облучения до максимального флюенса $2 \cdot 10^{20}$ н/см^2 на величину глубинного показателя скорости коррозии стали 316 LN и модифицированных сталей на ее основе

Заключение

Было исследовано влияние легирующих элементов и нейтронного облучения в реакторе ВВР-К до максимального флюенса $2 \cdot 10^{20}$ н/см^2 на стойкость к питтинговой коррозии аустенитной стали AISI 316 LN, подвергнутой провоцирующим нагревам при температурах от 500 до 800 °С. В частности, было установлено, что легирование азотом и марганцем значительно улучшает коррозионные свойства стали AISI 316 LN, а добавление меди и вольфрама снижает стойкость к питтинговой коррозии. Обнаружена анизотропия коррозионной стойкости в образцах исследуемых сталей, подвергнутых холодной прокатке, в зависимости от направления прокатки.

Показано, что провоцирующие нагревы при температурах от 500 до 800 °С с интервалом 100 °С ухудшают коррозионную стойкость сталей. При этом термическая обработка при 500–600 °С в течение 1 ч приводит к улучшению коррозионной стойкости вследствие частичной релаксации внутренних напряжений, возникших при прокатке стали. Провоцирующие нагревы при 700 и 800 °С в течение 1 ч вызывают сенсибилизацию, вследствие образования нитридов и карбидов хрома, а добавление меди уменьшает степень сенсибилизации. Скорость коррозии при этом достигает 31 мм/год для стали 316 LN и ~15 мм/год для всех исследуемых модифицированных сталей.

Установлено, что облучение нейтронами до максимального флюенса $2 \cdot 10^{20}$ н/см^2 исследуемых сталей после холодной прокатки и не подвергавшихся провоцирующим нагревам привело к уменьшению скорости коррозии. Вероятно, это произошло вследствие релаксации напряжений при нейтронном облучении.

Провоцирующие нагревы при температурах 700–800 °С облученных нейтронами образцов сталей 211 L-213 L привели к увеличению скорости коррозии в особенности в сталях, легированных медью. Нейтронное облучение в значительной степени (в 2–3 раза при небольших повреждающих дозах и до 10 раз при максимальном флюенсе нейтронов) усиливает эффект сенсибилизации.

Работа выполнена в рамках реализации ПЦФ по теме ИРН BR21881930 «Реакторные исследования, направленные на обеспечение безопасной и эффективной эксплуатации перспективных ядерных и термоядерных энергетических установок». Авторы выражают благодарность доктору J.T. Busby (ORNL, USA) и доктору M.N. Gussev (ORNL, USA) за предоставление для работы новых высокоазотистых сталей.

Литература / References

1. Ningshen S., Kamachi U., Mudali V.K., Mittal, H.S. Khatak Semiconducting and passive film properties of nitrogen-containing type 316LN stainless steels // Corrosion Science. – 2007. –Vol. 49. – No 2.– P. 481–496. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.05.041
2. Yakata K., Fukaya Y., Watanabe Y. Contribution of Cathodic Reaction inside crevice on the propagation of crevice corrosion of 304L SS in Chloride Solution // 20th International Conference on Env.Deg. of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors. – 2022. – P. 17321.
3. Eguchi K. Quantitative analysis of initiation site of pitting corrosion on type 304 austenitic stainless steel // Corrosion Science. – 2023 – Vol. 221. – P. 111312. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111312
4. Gonza´lez B.M., et al. The influence of copper addition on the formability of AISI 304 stainless steel // Mater. Sci. Eng. A. – 2003. – Vol. 343. –No 1-2. – P. 51–56. https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00362-3
5. LeMay I., Schetky L.M. Copper in Iron and Steel // New York, NY: Wiley. – 1982. – 448 p.
6. Geng H. et al. Effects of copper content on the machinability and corrosion resistance of martensitic stainless steel // J. Mater Sci. – 2008. – Vol.43. – No.1. – P. 83–87. https://doi.org/10.1007/s10853-007-2084-x
7. Hermas A.A., Hassab-Allah I.M. Microstructure, Corrosion and Mechanical Properties of 304 Stainless Steel Containing Copper, Silicon and Nitrogen // J. Materials Science. – 2001. – Vol. 36. – No. 14. – P. 3415–22. https://doi.org/10.1023/A:1017903810763
8. Wallen B., Liljas M., Stenvall P. A new high molybdenum, high nitrogen stainless steel // Materials and Design. – 1992. – Vol. 13. – P. 329–333. https://doi.org/10.1016/0261-3069(92)90002-Y
9. Rondelli G., Vicentini B., Cigada A. Influence of nitrogen and manganese on Localized Corrosion behavior of stainless steels in chloride environments // Materials and Corrosion. – 1995. – Vol. 46. – P. 628. https://doi.org/10.1002/maco.19950461104
10. Svahn F., Mishra P., Edin E., Åkerfeldt P., Antti M.-L. Microstructure and mechanical properties of a modified 316 austenitic stainless steel alloy manufactured by laser powder bed fusion // J. of Materials Research and Technology. – 2024. – Vol. 28. – P.1452–1462. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.12.063
11. Chen G., Du S., Zhou Z. The Effect of Replacing Ni with Mn on the Microstructure and Properties of Al_2O_3-Forming Austenitic Stainless Steels: A Review // Materials. – 2024. – Vol.17. – No.1.– P.19. https://doi.org/10.3390/ma17010019
12. Мазничевский А.Н. Изучение влияния кремния, азота и микролегирующих добавок бора и РЗМ на коррозионную стойкость и технологическую пластичность сталей аустенитного класса // Дисс. к.т.н. – Челябинск. – 2021. – 142 с. [Maznichevskiy A.N. Izuchenie vliyaniya kremniya, azota i mikrolegiruyushchikh dobavok bora i RZM na korrozionnuyu stoykost' i tekhnologicheskuyu plastichnost' staley austenitnogo klassa // Diss. k.t.n. – Chelyabinsk. – 2021. – 142 p.] (In Russ.)
13. Fu Y. et al. Effects of nitrogen on the passivation of nickel-free high nitrogen and manganese stainless steels in acidic chloride solutions. Electrochimica Acta. – 2009. – Vol. 54. – P. 4005-4014. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.02.02
14. Ha H.Y. et al. Effects of nitrogen on the passivity of Fe-20Cr alloy // Corrosion Science. – 2009. – Vol. 51. – P. 48–53. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.10.017.
15. Ma X. P., Wang L.J., Qin B., Liu C.M., Subramanian S.V. Effect of N on microstructure and mechanical properties of 16Cr5Ni1Mo martensitic stainless steel // Materials and Design. – 2012. – Vol.34. – P.74–81. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.064
16. Lee J.B., Yoon S.I. Effect on nitrogen alloying on the semiconducting properties of passive films and metastable pitting susceptibility of 316L and 316LN stainless steels // Materials Chemistry and Physics. – 2010. – Vol.122. – P.194–199. https://doi.org/10.1149/1.1939245.
17. Ran Q., Xu Y., Li J., Wan J., Xiao X., Yu H., Jiang L. Effect of heat treatment on transformation-induced plasticity of economical Cr19 duplex stainless steel // Materials and Design. – 2014. – Vol. 56. – P. 959–965. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.019
18. Tsuchiyama T., Takebe H., Tsuboi K., Takaki S. Surface-layer microstructure control for metastable austenitic stainless steel to prevent hydrogen permeation // Scripta Materialia. 2010. – Vol. 62. – P. 731–734. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.01.042
19. Sahlaoui H., Makhlouf K., Sidhom H., Philibert J. Effects of aging conditions on the precipitates evolution, chromium depletion and intergranular corrosion susceptibility of AISI 316L: Experimental and modeling results // Materials Sci. and Eng. – 2004. – Vol. 372. – No. 1–2. – P. 98–108. https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.12.017
20. Мазничевский А.Н., Гойхенберг Ю.Н., Сприкут Р.В. Исследование коррозионной стойкости аустенитных сталей не легированных и легированных азотом в окислительной и хлоридной средах // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy. – 2020. – Т. 20. – № 3. – С. 42–51. https://doi.org/10.14529/met200305 [Maznichevskiy A.N., Goykhenberg Yu.N., Sprikut R.V. Issledovanie korrozionnoy stoykosti austenitnykh staley ne legirovannykh i legirovannykh azotom v okislitel'noy i khloridnoy sredakh // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy. – 2020. – Vol. 20. – No. 3. – P. 42–51.] (In Russ.)
21. Мурадян С.О. Структура и свойства литейной коррозионнойстойкой стали, легированной азотом // Дисс. к.т.н. – М. – 2016. – 132 с. [Muradyan S.O. Struktura i svoystva liteynoy korrozionnoystoykoy stali, legirovannoy azotom // Diss. k.t.n. – Moscow – 2016. – 132 p.] (In Russ.)
22. Simmons J.W. Overview: high-nitrogen alloying of stainless steels // Materials Sci. and Eng.: A. – 1996. – Vol. 20. – No 2.– P.159–169. https://doi.org/10.1016/0921-5093(95)09991-3
23. Pradhan S.K., Bhuyan P., Mandal S. Influence of the individual microstructural features on pitting corrosion in type 304 austenitic stainless steel // Corrosion Science. – 2019. – Vol. 158. – P. 108091. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108091
24. Lai J.K., Shek C.H., Lo K.H. Stainless Steels: An Introduction and Their Recent Developments // Bentham Science Publishers. – 2012. – 168 p.
25. ASTM G 48-03, Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution (2003).
26. Беккерт М., Клемм Х. Способы металлографического травления // М.: Металлургия. – 1988. – 400 с. [Bekkert M., Klemm Kh. Sposoby metallograficheskogo travleniya // Moscow: Metallurgiya. – 1988. – 400 p.] (In Russ.)
27. Was G.S. Fundamentals of Radiation Materials Science: Metals and Alloys // New York, Springer. – 2007. – 827 p.

НЕЙТРОНДАРМЕН СӘУЛЕЛЕНДІРІЛГЕН AISI 316 LN БОЛАТЫНЫҢ ПИТТИНГ КОРРОЗИЯСЫНА ТӨЗІМДІЛІГІНЕ ХИМИЯЛЫҚ ҚҰРАМЫНЫНЫҢ ЖӘНЕ ТЕРМИЯЛЫҚ ӨҢДЕУДІҢ ӘСЕРІ

Д. А. Мережко*, А. М. Такиева, М. С. Мережко

ҚР ЭМ «Ядролық физика институты» РМК, Алматы, Қазақстан

**** Байланыс үшін E-mail: diana@inp.kz***

Бұл жұмыста легірлеуші элементтердің (азот, марганец, мыс және вольфрам) және ВВР-К реакторындағы нейтрондық сәулеленудің максималды $2 \cdot 10^{20}$ н/см^2 флюенсіне дейін сәулеленген және 500–800 ℃ температура аралығындағы провакациялық қыздыруға ұшыраған AISI 316 LN аустенитті болатының питтинг коррозиясына төзімділігіне әсері зерттелді. Марганец AISI 316 LN болатының коррозиялық қасиеттерін айтарлықтай жақсартады, ал мыс пен вольфрамды қосу коррозияға төзімділікті төмендететіні анықталды. 100 ℃ интервалмен 500-ден 800 ℃-қа дейін температурадағы қоздырғыш қыздырулар нитридтер мен хром карбидтерінің түзілуіне байланысты сәулеленбеген күйдегі болаттардың коррозияға төзімділігін нашарлататыны, ал мыс қосу сенсетизация дәрежесін төмендететіні көрсетілген. Алынған нәтижелерге сәйкес, нейтрондардың $2 \cdot 10^{20}$ н/см^2 максималды флюенске дейін сәулелендіру, суық илектеуден кейін және провакациялық қыздыруға ұшырамаған болаттардың коррозия жылдамдығының төмендеуіне әкелгені анықталды. Нейтрондармен сәулелендірілген 211 L-213 L болат үлгілерін 700–800 ℃ температурада қыздыру, коррозия жылдамдығының жоғарылауына әкелді, әсіресе мыспен легірленген болаттарда. Нейтрондық сәулелену сенсибилизация әсерін едәуір арттырады.

Түйін сөздер: *азотты болаттар, нейтронды сәулелендіру, легірлеу, сенсибилизация, питтинг коррозиясы*

INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION AND HEAT TREATMENT ON PITTING CORROSION RESISTANCE OF NEUTRON-IRRADIATED AISI 316 LN STEEL

D. A. Merezhko*, A. M. Takiyeva, M. S. Merezhko

RSE "Institute of Nuclear Physics" ME RK, Almaty, Kazakhstan

** E-mail for contacts: diana@inp.kz*

In this work, the influence of alloying elements (nitrogen, manganese, copper, and tungsten) and neutron irradiation in the VVR-K reactor up to a maximum fluence of $2 \cdot 10^{20}$ n/cm^2 on the resistance to pitting corrosion of austenitic steel AISI 316 LN, subjected to provoking heating at temperatures in the range of 500-800 °C. It has been established that alloying with nitrogen and manganese significantly improves the corrosion properties of AISI 316 LN steel, and the addition of copper and tungsten reduces the resistance to pitting corrosion. It has been shown that provoking heating at temperatures from 500 to 800 °C with an interval of 100 °C worsens the corrosion resistance of steels in a non-irradiated state due to the formation of chromium nitrides and carbides, and the addition of copper reduces the degree of sensitization. According to the results obtained, it was established that neutron irradiation to a maximum fluence of $2 \cdot 10^{20}$ n/cm^2 of the studied steels after cold rolling and not subjected to provoking heating led to a decrease in the corrosion rate. Provoking heating at temperatures of 700–800 °C of neutron-irradiated samples of steels 211 L-213 L led to an increase in the corrosion rate, especially in steels alloyed with copper. Neutron irradiation greatly enhances the sensitization effect.

Keywords: *nitrogen steels, neutron irradiation, alloying, sensitization, pitting corrosion.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-44-48
УДК: 543.621

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПНЕВМОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ НА РЕАКТОРЕ ВВР-К ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ЗОЛОТА В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ

С. Г. Ленник, К. А. Бедельбекова*, Е. К. Соколенко

РГП «Институт ядерной физики» МЭ РК, Алматы, Казахстан

** E-mail для контактов: kamshat1980@mail.ru*

Изучена возможность определения золота в 200 мг порошковых образцах методом ИНАА с применением пневмотранспортной системы КИР ВВР-К. Проведены исследования проб золотосодержащей руды и хвостов ее переработки. Отработаны режимы облучения для проведения унифицированных исследований. Для нескольких режимов исследований определены пределы обнаружения золота. Проведен анализ полученных результатов. Данный метод может быть успешно применен для разбраковки и анализа проб при проведении исследований больших партий геологических образцов.

Ключевые слова: *золото, нейтронно-активационный анализ, пневмотранспортная система, содержания, пределы обнаружения.*

Введение

Существующие методы для определения элементного состава исследуемых образцов имеют ряд достоинств и недостатков [1, 2]. Например, масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой обладает хорошей чувствительностью и большим диапазоном определяемых элементов, но при этом требует предварительной процедуры химического разложения образца [3]. Метод рентгено-флуоресцентного анализа не пригоден для определения содержаний золота менее 10 мкг/г. Высокочувствительным методом для определения малых примесей золота в твердых образцах со слабоактивируемой матрицей является инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА). Золото имеет высокое сечение активации тепловыми и резонансными нейтронами и обладает хорошо доступной для гамма-спектрометрических измерений аналитической линией наведенной активности радионуклида ^{198}Au. Метод ИНАА не требует сложной химической пробоподготовки (образцы сушатся, измельчаются до размера частиц 200 меш) и большого расхода образцов (используются навески массой менее 1 г). Надежность количественного определения связана с выбором стандартных образцов (СО), важной характеристикой которых является масса представительной навески, поскольку известно, что золото может быть неравномерно распределено в образце даже при истирании образца до размера 200 меш (74 мкм). Предел обнаружения (ПО) золота при 2-х часовом облучении 100 мг навесок руды в вертикальном канале реакторе ВВР-К нейтронами с плотностью потока порядка 10^{13} н·см$^{-2}$·с$^{-1}$ составляет 0,001 мкг/г. Зачастую такого низкого предела обнаружения золота и не требуется (например, при проведении массового анализа большой партии геологических проб с целью оценки золотых запасов и/или рентабельности извлечения) и тогда привлечение метода ИНАА кажется необоснованным. К недостаткам метода ИНАА следует отнести требования к наличию достаточно мощного источника нейтронов, образование высокоактивных облученных образцов (по сути источников ионизирующего излучения), привлечения специально обученного персонала к проведению работ, а также необходимость учета и хранения источников согласно санитарным правилам «Санитарно-эпидемиологические требования к обеспечению радиационной безопасности РК».

В настоящей работе приводятся результаты изучения возможности определения золота методом ИНАА с облучением образцов с помощью пневмотранспортной системы (ПТС) [4] с плотностью потока нейтронов в облучательной камере 10^{12} н·см$^{-2}$·с$^{-1}$. Облучение на ПТС позволит увеличить производительность, существенно снизить флюенс (произведение потока на время облучения), что приведет к снижению активности облученных образцов, уменьшению дозовой нагрузки на персонал группы А.

Экспериментальные исследования

ПТС предназначена для проведения ИНАА по короткоживущим радионуклидам. Навеска с исследуемым образцом помещается в транспортную капсулу из полиэтилена низкого давления, которая под действием сжатого воздуха по трубопроводу перемещается в облучательную камеру, установленную в сухом горизонтальном канале реактора ВВР-К. Поскольку канал неохлаждаемый, а полиэтилен обладает значительным коэффициентом теплового расширения (что может привести к застреванию капсул в трубопроводе ПТС), то длительность облучения образцов ограничена максимально допустимой температурой нагрева транспортной капсулы [5]. Это вызывает ряд ограничений по массе и времени облучения образцов.

Увеличение массы образца положительно скажется на представительности навески, но при массе более 200 мг возникает ряд сложностей: поскольку размеры пакетика с такой навеской превышают диаметр

транспортной капсулы, необходимо насыпать образец в дорогостоящие полиэтиленовые виалки. Кроме того, в ходе ранее проведенных исследований золотосодержащих микрокернов (с массой 5–11 грамм) [6], экспериментально установлено, что чрезмерно массивный образец, двигаясь внутри ПТС с большой скоростью, может вызвать механические повреждения облучательной и измерительной камер при ударе. В связи с этим, исследования тяжелых (более 1 г) образцов были прекращены.

Возвращаемый из облучательной камеры образец испускает ионизирующее излучение, поэтому, с помощью управляющего программного обеспечения ПТС, образцы после облучения автоматически направляются в свинцовый колодец, что в значительной степени обеспечивает экранирование находящегося в помещении персонала от гамма-излучения.

В качестве стандартных образцов состава для определения концентрации золота применялись флотконцентраты СЗР-3 (ГСО 8815-2006), СЗР-4 (ГСО 8816-2006) (производства Института геохимии им. А.П. Виноградова, г. Иркутск) и образцы золотосодержащих руд OREAS 506, OREAS 600b, OREAS 607b, OREAS 907 и OREAS 908 производства OREAS, Melbourne, Australia. Для флотконцентрата в паспорте указана масса представительной навески при определении золота – 100 мг. В паспортах на стандартные образцы OREAS указано, что содержание золота определено методом нейтронно-активационного анализа по 20 параллельным 85 мг навескам.

В качестве исследуемых образцов были использованы образцы золотосодержащей руды (коды образцов от 1 до 9) и хвостов ее переработки (коды образцов 11–12). Образцы для исследования были получены в пригодном для анализа виде, поэтому пробоподготовка в виде высушивания, механического измельчения проб, просеивания и т.п. не требовалась.

С помощью аналитических весов METTLER TOLEDO с точностью 0,1 мг были отобраны навески массой 200 мг. Навески запаивались в двойные полиэтиленовые пакеты квадратной формы, размером 1×1 см^2. Это позволяет избежать просыпания образца внутри капсулы в случае повреждения одного из пакетов. Затем образец помещался посередине транспортной капсулы с помощью двух пластиковых трубок-фиксаторов одинаковой длины [7].

Все образцы исследованы в одинаковом режиме: массы навесок 200 мг, время облучения 2 минуты на ПТС. Время «остывания» (прошедшее после активации капсулы) составляло 5 суток.

Регистрация спектров стандартных образцов и исследуемых образцов с номерами от 01 до 06 выполнялась на полупроводниковом гамма-спектрометре ORTEC GEM40P4 без излечения из транспортных капсул с использованием специальной насадки. Время регистрации спектров наведенной активности составляло 20 мин. В таком же режиме была исследована пустая транспортная капсула с фиксаторами внутри. Поскольку в капсуле и трубках также содержится ряд элементов, подверженных нейтронной активации, анализ спектра требовался для того, чтобы убедиться в отсутствии каких-либо следов золота.

Исследуемые образцы с номерами от 07 до 11 через 5 суток после облучения извлекались из транспортных капсул и размещались в специальных пластиковых контейнерах. Регистрация спектров выполнялась на том же гамма-спектрометре с помощью оригинального устройства смены образцов (УСО), позволяющего измерять образцы в контейнерах на заданной высоте с установленным временем в автоматическом режиме без участия оператора. Время набора спектров составило 2 часа.

При регистрации спектров все образцы размещались на расстоянии 2,5 см от окна детектора. Загрузка (мертвое время) гамма-спектрометра не превышала 3%. Одинаковый режим облучения и «остывания» был выбран специально для отработки разбраковки образцов в реальных условиях. Разное время регистрации спектра позволило оценить предел обнаружения золота для двух используемых способах гамма-измерений наведенной активности: ручной режим без переупаковки и автоматический режим с переупаковкой.

Обработка спектров выполнена с использованием пакета программного обеспечения Genie-2000. Расчет концентраций и пределов обнаружения выполнен относительным методом с использование программного обеспечения «Концентрация» [8].

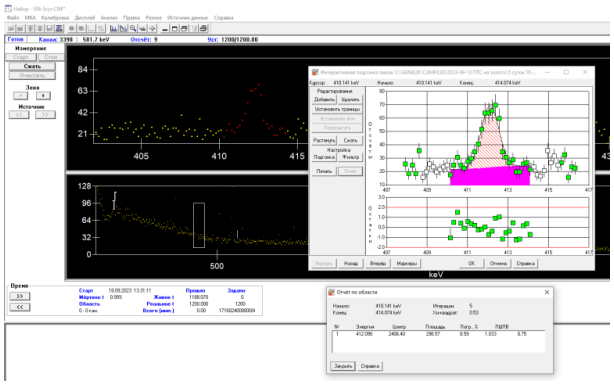
Обсуждение результатов

При анализе спектра облученной пустой транспортной капсулы с фиксаторами внутри пика золота не было обнаружено. На рисунке 1, а приведен фрагмент спектра образца OREAS 506, регистрация спектра в течении 20 минут. Аттестованное содержание золота 0,364 мкг/г, погрешность статистического описания пика ^{198}Au составляет 8.5%. На рисунке 1, б приведен фрагмент спектра исследуемого образца 09, регистрация спектра в течение 2 часов. Длительный набор спектра обеспечивает погрешность статистического описания пика ^{198}Au в 30%.

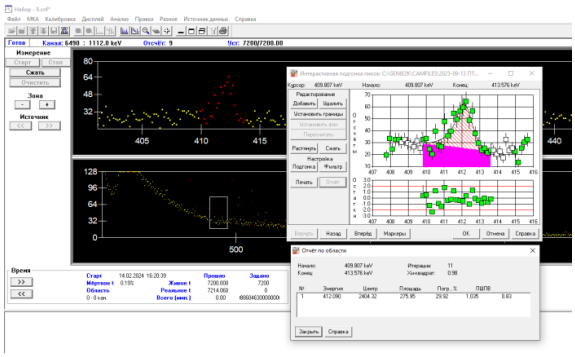
В таблицах 1 и 2 приведены результаты определения содержаний золота и пределов его обнаружения в стандартных и исследуемых образцах. Расчет содержаний выполнен по стандартным образцам флотконцентратов СЗР-3 и СЗР-4. Для стандартных образцов приведены аттестованные паспортные значения массовых долей золота.

Для исследуемых образцов приведено сравнение результатов и пределов обнаружения, полученных с использованием ПТС и при облучении в вертикальном канале реактора ВВР-К. Режим исследования в вертикальном канале: поток нейтронов $7\cdot10^{13}$ н·см$^{-2}$·с$^{-1}$, время облучения 2 ч, время «остывания» 7 суток, регистрации спектров наведенной ак-

тивности проведена на том же гамма-спектрометре в автоматическом режиме с УСО в течение 30 минут.



а)



б)

Рисунок 1. Аналитические гамма-линии ^{198}Au в спектрах образцов. Облучение на ПТС 2 минуты, «остывание» 5 суток, масса навески 200 мг

Таблица 1. Содержание и предел обнаружения Au в стандартных образцах, мкг/г

Образец	Расчетные значения	Аттестованные значения	ПО, регистрация 20 мин	ПО, регистрация 2 ч
СЗР-3	4,67 ± 0,18	4,25 ± 0,11	0,27	0,11
СЗР-4	1,96 ± 0,19	2,13 ± 0,05	0,23	0,074
OREAS 506	0,379 ± 0,095	0,364 ± 0,010	0,11	
OREAS 600b	0,191 ± 0,059	0,204 ± 0,007	0,12	
OREAS 607b	0,662 ± 0,044	0,734 ± 0,015	0,16	
OREAS 908	0,185 ± 0,056	0,186 ± 0,008	0,092	

Предел обнаружения золота при облучении на ПТС для массы навески 200 мг, времени облучения 2 минуты, времени «остывания» 5 суток, времени регистрации спектра наведенной активности в течение 20 минут составляет от 0,08 до 0,2 мкг/г. Для такого же режима и времени регистрации 2 ч – составляет от 0,02 до 0,05 мкг/г.

Таблица 2. Содержание и предел обнаружения Au в исследуемых образцах, мкг/г

Образец	Расчетные значения		ПО, облучение 2 мин на ПТС	ПО, облучение 120 мин в верт. канале	
	Облучение на ПТС	Облучение в вертикальном канале	Регистрация 20 мин	Регистрация 2 ч	Регистрация 40 мин
01	0,53±0,10	0,568±0,024	0,096		0,011
02	0,56±0,18	0,653±0,026	0,11		0,010
03	1,47±0,25	1,697±0,056	0,095		0,009
04	3,81±0,20	4,00±0,12	0,13		0,010
05	0,49±0,11	0,550±0,035	0,20		0,006
06	0,099±0,033	0,093±0,007	0,083		0,005
07	0,496±0,050	0,512±0,015		0,047	0,003
08	1,310±0,063	1,350±0,043		0,049	0,004
09	0,055±0,018	0,062±0,002		0,021	0,001
10	5,88±0,18	5,97±0,21		0,040	0,005
11	< 0,02	0,0021±0,0005		0,014	0,0007
12	< 0,02	0,0013±0,0002		0,015	0,0007

Анализ полученных результатов показывает:

– Время облучения 2 минуты на ПТС и масса навески 200 мг могут использоваться для универсального прогона образцов с концентрациями золота в диапазоне от 0,1 до 6 мкг/г.

– Содержания, определенные по гамма-спектрам, зарегистрированным спустя 5 суток после облучения, позволяют определить содержания золота в образце более 0,1 мкг/г при времени регистрации спектра 20 мин. Предел обнаружения золота можно уменьшить за счет 1) увеличения времени «остывания» до 7–9 суток, 2) времени регистрации спектра.

Относительно короткий период полураспада большинства радионуклидов в составе образца, в том числе золота, позволяет избегать накопления больших объемов радиоактивных материалов. Так, измерение спектров облученных проб спустя месяц после облучения показало практически полное отсутствие наведенной активности. Тем не менее, из-за того, что образцы подверглись облучению в канале реактора, утилизировать их как обычные отходы невозможно, требуется передать их на пункт захоронения радиоактивных отходов. При необходимости, стандартные образцы пригодны к повторному использованию для метода НАА. Кроме того, все облучаемые на ПТС навески можно при необходимости исследовать в вертикальном канале реактора для получения уточненных значений содержаний. В зависимости от полученных на ПТС данных, образцы будут группироваться в партии и исследоваться в подходящем режиме облучения/«остывания» и регистрации.

Заключение

Применение ПТС позволяет определять содержания золота в малых навесках руды с пределом обнаружения 0,05 мкг/г и ниже.

Облучение меньшим флюенсом нейтронов (нежели в вертикальном канале ВВР-К) позволяет избежать больших наведенных активностей, но при этом получать результаты, пригодные для разбраковки проб. Данный метод может быть успешно применен для разбраковки и анализа проб при проведении исследований больших партий геологических образцов.

Для достижения лучшего предела обнаружения необходимо проводить облучение в вертикальном канале реактора.

Данная работа выполнена в рамках бюджетного финансирования Министерства Энергетики Республики Казахстан «Развитие ядерно-физических методов и технологий для инновационной модернизации экономики Казахстана» ИРН: BR23891691.

Литература

1. И. В. Кубракова, С. Н. Набиуллина, О. А. Тютюнник Определение ЭПГ и золота в геохимических объектах: опыт использования спектрометрических методов // Геохимия. – 2020. – Т. 65. – № 4. – С. 328–342. https://doi.org/10.31857/S0016752520040056
2. Г. А. Олейникова, Ю. Н. Борин, В. Л. Кудряшов, В. А. Шишлов, С. С. Шевченко, О. В. Петров. Восстановительное разложение – основа универсальной методики анализа горных пород на содержание благородных металлов // Металлогения. – 2021. – № 85. – С. 93–102.
3. Я.В. Бычкова, М.Ю. Синицын, Д.Б. Петренко, И.Ю. Николаева, И.А. Бугаев, А.Ю. Бычков. Методические особенности многоэлементного анализа горных пород методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. // Вестник Московского. университета. – Сер. 4. – Геология. – 2016. – № 6. – С. 56–63. https://doi.org/10.33623/0579-9406-2016-6-56-63
4. S.S. Ismail. A New Automated Sample Transfer System for Instrumental Neutron Activation Analysis // Journal of Automated Methods and Management in Chemistry. – 2010. – Vol. 2010. – P. 8 https://doi.org/10.1155/2010/389374
5. Ленник С.Г., Соколенко Е.К., Бедельбекова К.А. Изучение возможности использования полиэтилена отдельных марок (видов) для изготовления транспортных капсул, необходимых при проведении нейтроноактивационного анализа по короткоживущим изотопам // Вестник НЯЦ РК. – 2021. – Вып. № 2. – С. 11–18. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-2-11-18
6. I.Yu. Silachyov, V.A. Glagolev. Comparator neutron activation analysis of the solid volumetric rock samples for gold content // International Journal of Biology and Chemistry. – 2022. – Vol. 15, No. 1, P. 90–101. https://doi.org/10.26577/ijbch.2022.v15.i1.010
7. С.Г. Ленник, К.А. Бедельбекова, Е.К. Соколенко, Т.В. Суздальцева. Использование полиэтиленовых расходных материалов при проведении нейтронно-активационного анализа по короткоживущим радионуклидам // Chemical Bulletin of Kazakh National University / Analytical chemistry. – 2023. – Vol. 108. – No. 1. – P. 4–11. https://doi.org/https://doi.org/10.15328/cb1318
8. Дмитриев А.Ю. Павлов С.С. Автоматизация количественного определения содержания элементов в образцах методом нейтронного активационного анализа на реакторе ИБР-2 в ЛНФ ОИЯИ // Письма в ЭЧАЯ. – 2013. – Т. 10. – № 1 (178). – С. 58–64.

References

1. I. V. Kubrakova, S. N. Nabiullina, O. A. Tyutyunnik Opredelenie EPG i zolota v geokhimicheskikh ob"ektakh: opyt ispol'zovaniya spektrometricheskikh metodov // Geokhimiya. – 2020. – Vol. 65. – No. 4. – P. 328–342. https://doi.org/10.31857/S0016752520040056
2. G. A. Oleynikova, Yu. N. Borin, V. L. Kudryashov, V. A. Shishlov, S. S. Shevchenko, O. V. Petrov. Vosstanovitel'noe razlozhenie – osnova universal'noy metodiki analiza gornykh porod na soderzhanie blagorodnykh metallov // Metallogeniya. – 2021. – No. 85. – P. 93–102.
3. Ya.V. Bychkova, M.Yu. Sinitsyn, D.B. Petrenko, I.Yu. Nikolaeva, I.A. Bugaev, A.Yu. Bychkov. Metodicheskie osobennosti mnogoelementnogo analiza gornykh porod metodom mass-spektrometrii s induktivno svyazannoy plazmoy. // Vestnik Moskovskogo. universiteta. – Ser. 4. – Geologiya. – 2016. – No. 6. – P. 56–63. https://doi.org/10.33623/0579-9406-2016-6-56-63
4. S.S. Ismail. A New Automated Sample Transfer System for Instrumental Neutron Activation Analysis // Journal of Automated Methods and Management in Chemistry. – 2010. – Vol. 2010. – P. 8 https://doi.org/10.1155/2010/389374
5. Lennik S.G., Sokolenko E.K., Bedel'bekova K.A. Izuchenie vozmozhnosti ispol'zovaniya polietilena otdel'nykh marok (vidov) dlya izgotovleniya transportnykh kapsul, neobkhodimykh pri provedenii neytronoaktivatsionnogo analiza po korotkozhivushchim izotopam // Vestnik NYaTs RK. – 2021. – Issue No. 2. – P. 11–18. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-2-11-18
6. I.Yu. Silachyov, V.A. Glagolev. Comparator neutron activation analysis of the solid volumetric rock samples for gold content // International Journal of Biology and Chemistry. – 2022. – Vol. 15, No. 1, P. 90–101. https://doi.org/10.26577/ijbch.2022.v15.i1.010
7. S.G. Lennik, K.A. Bedel'bekova, E.K. Sokolenko, T.V. Suzdal'tseva. Ispol'zovanie polietilenovykh raskhodnykh materialov pri provedenii neytronno-aktivatsionnogo analiza po korotkozhivushchim radionuklidam // Chemical Bulletin of Kazakh National University / Analytical chemistry. – 2023. – Vol. 108. – No. 1. – P. 4–11. https://doi.org/https://doi.org/10.15328/cb1318
8. Dmitriev A.Yu. Pavlov S.S. Avtomatizatsiya kolichestvennogo opredeleniya soderzhaniya elementov v obraztsakh metodom neytronnogo aktivatsionnogo analiza na reaktore IBR-2 v LNF OIYaI // Pis'ma v EChAYa. – 2013. – Vol. 10. – No. 1 (178). – P. 58–64.

ГЕОЛОГИЯЛЫҚ ҮЛГІЛЕРДІҢ ҚҰРАМЫНДА АЛТЫНДЫ АНЫҚТАУ ҮШІН ССР-Қ РЕАКТОРЫНДА ПНЕВМАТИКАЛЫҚ ТАСЫМАЛДАУ ЖҮЙЕНІ ПАЙДАЛАНУ МҮМКІНДІГІН ЗЕРТТЕУ

С. Г. Ленник, К. А. Бедельбекова*, Е. К. Соколенко

ҚР ЭМ «Ядролық физика институты» РМК, Алматы, Қазақстан

** Байланыс үшін E-mail: kamshat1980@mail.ru*

200 мг ұнтақ үлгілеріндегі алтынды ЗРК ССР-Қ реакторында пневматикалық тасымалдау жүйесін қолдану арқылы ИНБТ әдісімен анықтау мүмкіндігі зерттелді. Алтын кені мен оны өңдеуден алынған қалдықтардың үлгілеріне зерттеулер жүргізілді. Стандартталған зерттеулер жүргізу үшін сәулелену режимдері әзірленді. Бірнеше зерттеу режимдері үшін алтынды анықтау шектері анықталды. Алынған нәтижелерге талдау жасалды. Бұл әдісті геологиялық үлгілердің үлкен партияларын зерттеу кезінде үлгілерді сұрыптау және талдау үшін сәтті қолдануға болады.

Түйін сөздер: *алтын, нейтронды белсендіру талдау, пневматикалық тасымалдау жүйесі, мөлшері, анықтау шегі.*

USE OF PNEUMATIC TRANSPORT SYSTEM ON REACTOR WWR-K FOR DETERMINATION OF GOLD CONTENT IN GEOLOGICAL SAMPLES

S. G. Lennik, K. A. Bedelbekova*, E. K. Sokolenko

RSE "Institute of Nuclear Physics" ME RK, Almaty, Kazakhstan

** E-mail for contacts: kamshat1980@mail.ru*

The possibility of determination of gold in 200 mg powder samples by INAA method with the use of pneumatic transport system RRC WWR-K has been studied. Gold-containing ore samples and tailings of its processing were studied. Irradiation modes for unified studies were worked out. Gold detection limits were determined for several research modes. The obtained results were analyzed. The given method can be successfully applied for disassembling and analysis of samples when carrying out researches of large batches of geological samples.

Keywords: *gold, neutron activation analysis, pneumatic transport system, content, detection limits.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-49-55
УДК 621.039

РАСЧЕТ НЕЙТРОННЫХ И ГАММА ПОЛЕЙ В НИШЕ ТЕПЛОВОЙ КОЛОННЫ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ВВР-К, РАССМАТРИВАЕМОЙ В КАЧЕСТВЕ МЕСТА РАЗМЕЩЕНИЯ ИСТОЧНИКА УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ

К. Турлыбекулы[1,2*], А. А. Шаймерденов[1], Д. С. Сайранбаев[1], Д. Шапиро[1], Б. Мухаметулы [2], О. Баяхметов[1], С. К. Сахиев[1]

[1] РГП «Институт ядерной физики» МЭ РК, Алматы, Казахстан
[2] Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

** E-mail для контактов: k.turlybekuly@inp.kz*

ВВР-К (Водо-Водяной Реактор - Казахстанский) был перезапущен после капитальной модернизации, связанной с его конверсией на низкообогащенное урановое (НОУ) топливо, и с сентября 2016 года работает на НОУ топливе. Реактор, построенный в 1967 году, был значительно модернизирован в соответствии с современными требованиями безопасности. Этот важный источник нейтронов в Казахстане служит различным целям, таким как фундаментальные и прикладные исследования в области физики, химии, биологии, материаловедения, а также для радиационной обработки материалов и производства радиоизотопов. Он также применяется для подготовки кадров. На базе реактора ВВР-К планируется запустить проекты по приборостроению, которые позволят установить базовый набор экспериментальных станций. Значительные усилия будут прилагаться для создания источника ультрахолодных нейтронов (УХН), что позволит расширить исследовательские возможности. Для этого предлагается использовать нишу тепловой колонны – горизонтальный канал большого диаметра, позволяющий облучать объекты с размерами до 1000 мм. Кроме того, в нише тепловой колонны имеются четыре радиальных канала, которые могут быть использованы для вывода холодных (10^{-6}–10^{-3} эВ) и очень холодных (10^{-7}–10^{-6} эВ) нейтронов. В статье приведены расчеты пространственного и энергетического распределений нейтронного и гамма-полей для текущей и для содержащей дополнительный замедлитель конфигураций ниши тепловой колонны реактора ВВР-К. Показано, что конфигурация с дополнительным замедлителем не приводит к увеличению полей медленных нейтронов (<1 эВ), и имеющаяся толщина замедлителя является оптимальной.

***Ключевые слова**: ВВР-К реактор, нейтроны, гамма кванты, ниша тепловой колонны, нейтронный замедлитель, MCNP.*

Введение

ВВР-К – это исследовательский реактор бакового типа. Номинальная мощность реактора составляет 6 МВт. Теплоносителем и замедлителем служит обессоленная вода. Отражателем нейтронов является обессоленная вода и бериллий. Максимальная плотность потока тепловых нейтронов в центральных облучательных каналах активной зоны составляет $2 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$ с$^{-1}$ [1, 2].

Реактор предназначен для исследования в области фундаментальной и прикладной физики, радиационной химии и изучения свойств материалов и изделий, облучаемых в реакторе и др.:

− реактор ВВР-К служит инструментом научных исследований и разработок в области энергетического исследования, как в энергосбережении, так и в производстве (например, разработка новых материалов для производства и хранения энергии, исследование материалов и структурных компонентов для термоядерной энергетики или реакторов нового поколения, разработка новых энергосберегающих технологий) [3–8].

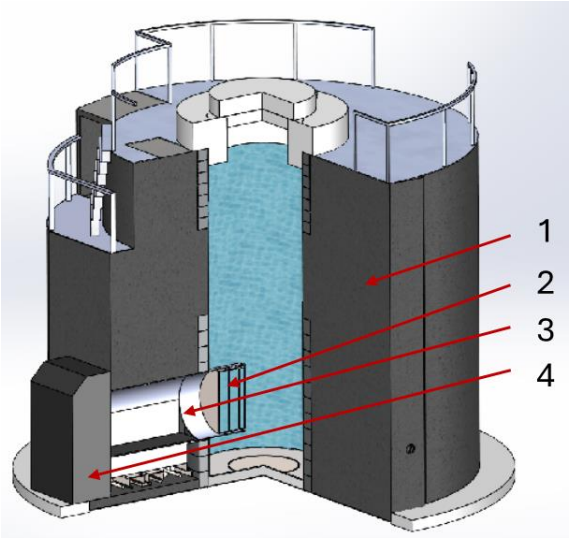
− реактор также является комплексным источником облучения для испытаний и модификации материалов, инженерии, здравоохранении и т. д. Производство радиоизотопов с использованием вертикальных каналов облучения активной зоны имеет решающее значение для общества [9, 10].

− наиболее широкое применение реактора ВВР-К может быть в исследованиях с использованием выведенного нейтронного пучка. Для направления и выведения нейтронов в реакторный зал реактор оснащен пятью горизонтальными каналами, горизонтальным тангенциальным и горизонтальным каналом большого диаметра – тепловой колонной. Для исследований по физике твердого тела и ядерной физике были начаты работы по оснащению физическим оборудованием реактора и размещению установок на горизонтальных каналах реактора. Одной из первых современных созданных установок является инструмент по нейтронной радиографии и томографии TITAN, который размещен на первом горизонтальном канале [11]. В продолжение оснащения физическим оборудованием реактора в настоящее время начались работы по созданию установки нейтронной рефлектометрии на четвертом горизонтальном канале. Таким образом, программа разработки и создания приборов продолжается, и в настоящее время в эксплуатации находится полноценно одна экспериментальная станция, а другая находится в процессе проектирования и создания.

Одной из следующих работ по программе разработки и создания приборов на базе реактора ВВР-К является возможность производства ультрахолодных нейтронов (УХН) с высокой объемной плотностью, которая предполагает размещение установки большого размера. Для этой цели на реакторе существует подходящий канал – ниша тепловой колонны. В работе [12] были приведены радиационные характеристики ниши. Однако, полученных данных недостаточно для разработки концепции источника УХН, так как для этого требуется подробное знание пространственного и энергетического распределений нейтронов и гамма-квантов. В настоящей работе приведены результаты подробного расчетного моделирования ниши тепловой колонны исследовательского реактора ВВР-К и определены радиационные характеристики ниши, которые являются основой для принятия решения о возможности использования ниши тепловой колонны для размещения источника УХН.

Исследовательский реактор ВВР-К и ниша тепловой колонны

Ниша тепловой колонны реактора ВВР-К представляет собой цилиндр диаметром 1080 мм (рисунок 1). В бетонной защите ниша продолжается чугунным полукруглым тоннелем. Ниша заполнена воздухом. Доступ к нише есть через два вертикальных канала диаметром 100 мм в баке реактора и через вертикальный колодец размерами 580×235 мм в бетонной защите реактора, а также с наружной стороны через откатную защиту из чугуна. Следует отметить, что в нише имеется система экранов, заполненных водой, которая предназначена для изменения соотношения гамма и нейтронной компонент поля реакторного излучения. Система водяных экранов представляет собой три бака, которые могут дистанционно заполняться или опорожняться [12].



1 – бетонная защита реактора; 2 – водяные экраны; 3 – ниша тепловой колонны; 4 – откатная защита.

Рисунок 1. 3D модель реактора ВВР-К

Как показано на рисунке 1, начальная часть ниши тепловой колонны, примыкающая к активной зоне реактора ВВР-К, со всех сторон окружена водой, и глубина погружения в воду составляет около ~600 мм. Слой воды между передней стенкой ниши тепловой колонны и внешними поверхностями бериллиевых отражателей активной зоны составляет ~5 см. От ниши также отходят 4 горизонтальных радиальных канала, которые потенциально могут быть использованы для вывода холодных (10^{-6}–10^{-3} эВ) и очень холодных (10^{-7}–10^{-6} эВ) нейтронов.

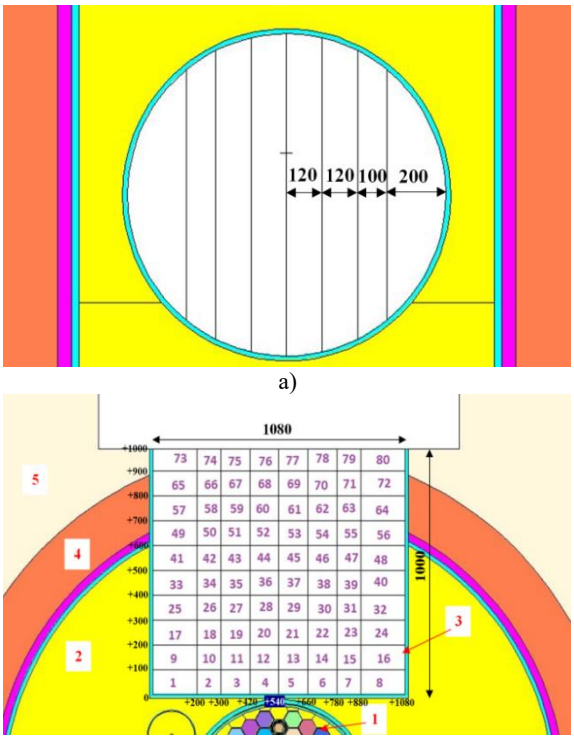
Расчёт распределения нейтронов и гамма-квантов в нише тепловой колонны с вакуумной средой

В работе [12] были определены радиационные характеристики для текущей конфигурации ниши тепловой колонны, в которой экранирующие баки заполнены водой, а сама ниша тепловой колонны – воздухом. Полученные характеристики при такой конфигурации оказались недостаточными для производства УХН с высокой объемной плотностью.

Поэтому в данной работе нами был проведен расчет плотностей потоков нейтронов и гамма-квантов в пустой нише тепловой колонны с вакуумной средой. При построении энергетического распределения использовалось разбиение нейтронов на 4 группы: <1 эВ, 1 эВ÷100 кэВ, 100 кэВ÷1 МэВ, >1 МэВ, а также разбиение гамма-квантов на 3 группы: <1,5 МэВ, 1,5 МэВ÷4 МэВ, >4 МэВ. Для получения пространственного распределения регистрационная зона в нише тепловой колонны была разделена на 10 поперечных и 8 продольных областей, образующих 80 ячеек (см. рисунок 2)

Расчетное моделирование физических процессов в реакторе ВВР-К с целью определения его радиационных характеристик проводилось методом Монте-Карло с помощью MCNP6 [13]. Транспортный код MCNP6 предназначен для решения задач в области физики ядерных реакторов, радиационной защиты, дозиметрии, радиографии, радиационной медицины и ядерной безопасности. Пользователь имеет возможность моделировать геометрические трехмерные конфигурации, задавая математические уравнения ограничивающих их поверхностей первой, второй и четвертой степени, и их заполнение произвольным материалом, задавая концентрации ядер элементов, входящих в состав вещества. При моделировании в транспортном коде MCNP6 использовалась библиотека сечений взаимодействия нейтронов с веществом ENDF/B-VII.1 [14]. В MCNP6 была смоделирована текущая конфигурация активной зоны и ниши тепловой колонны реактора ВВР-К с реальным материальным составом. При моделировании использовалась расчетная модель реактора ВВР-К, которая ранее была валидирована по многочисленным экспериментам [15–21], где было показано, что гетерогенное описание всех элементов и компонентов реактора, а также использование реального материального состава ак-

тивной зоны (фактическое выгорание в каждой ТВС, учет «отравления» блоков бериллия) позволили получить хорошее согласие результатов расчетов с экспериментальными данными. Начальными условиями в расчетной модели были приняты: температура теплоносителя, конструктивных элементов, топлива – 293,6 K, плотность воды – 0.998 г/см^3, k_{eff} = 1. Входной расчетный файл включал 500 циклов, составленных из 50 неактивных и 450 активных циклов с 50000 историй на цикл. Температура всех изотопов, данные о сечениях которых использовались в расчетах, составляла 293,6 K. Статистическая относительная погрешность расчетов для эффективного коэффициента размножения нейтронов не превышала 0,02%; для потока нейтронов не превышала 3%.



1 – активная зона, 2 – вода, 3 – ниша тепловой колонны, 4 – чугунная защита, 5 – тяжелый бетон.

Рисунок 2. Вертикальный (а) и горизонтальный (б) разрезы математической модели реактора ВВР-К

Полученные энергетические и пространственные распределения нейтронов и гамма-квантов в вакуумированной нише тепловой колонны реактора ВВР-К представлены на рисунках 3 и 4 соответственно. Наибольшая плотность потока нейтронов составляет ~10^{12} см$^{-2}$ с$^{-1}$. Плотность потока гамма-квантов достигает ~$8 \cdot 10^{12}$ см$^{-2}$ с$^{-1}$. Максимумы плотности находятся напротив активной зоны вблизи передней стенки ниши тепловой колонны для всех диапазонов энергий нейтронов и гамма-квантов. Это означает, что нейтроны и гамма-кванты попадают в нишу преимущественно через ее переднюю стенку.

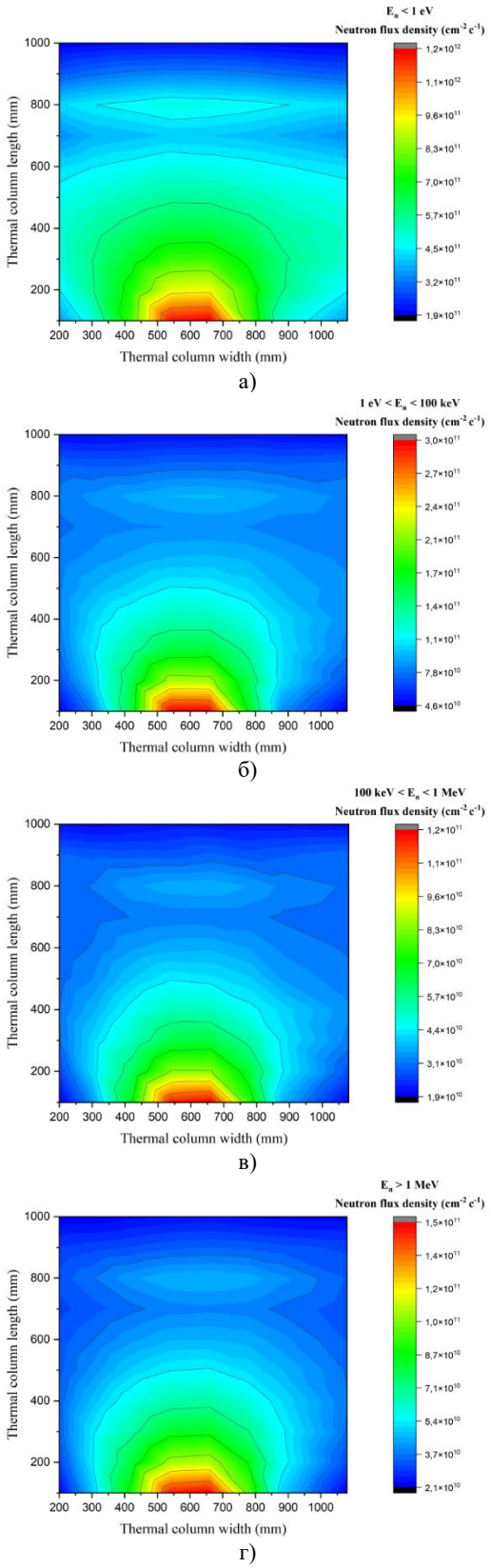


Рисунок 3. Пространственное и энергетическое распределение нейтронов в нише тепловой колонны реактора ВВР-К: (а) нейтроны с энергией <1 эВ; (б) нейтроны с энергией 1 эВ÷100 кэВ; (в) нейтроны с энергией 100 кэВ÷1 МэВ; (г) нейтроны с энергией >4 МэВ

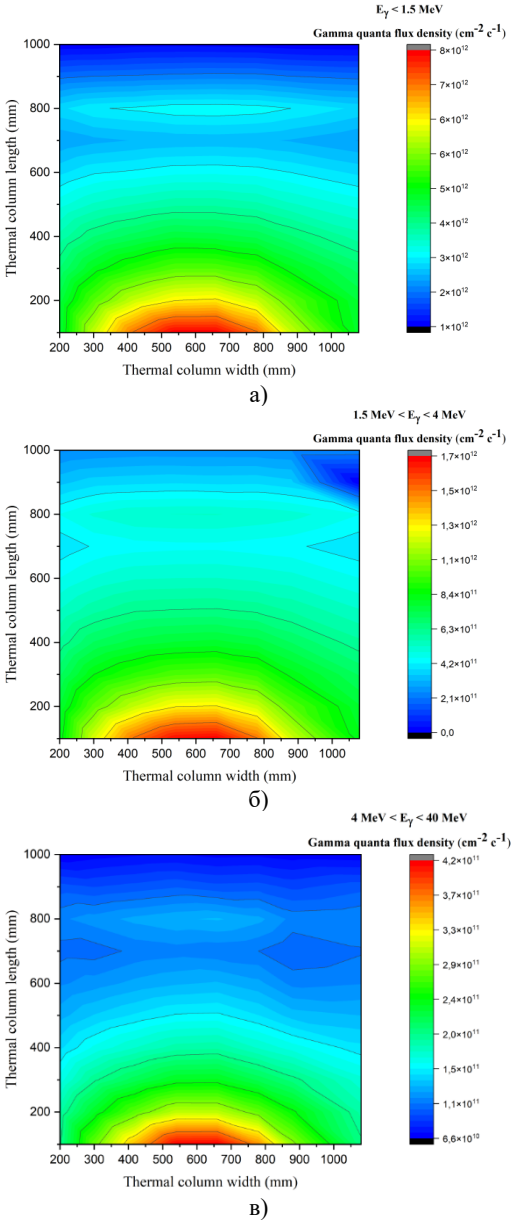


Рисунок 4. Пространственное и энергетическое распределение гамма-квантов в нише тепловой колонны реактора ВВР-К: (а) гамма-кванты с энергией <1,5 МэВ; (б) гамма-кванты с энергией 1,5 МэВ÷4 МэВ; (в) гамма-кванты с энергией >4 МэВ

РАСЧЁТ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНОВ В НИШЕ ТЕПЛОВОЙ КОЛОННЫ С ВАКУУМНОЙ СРЕДОЙ, СОДЕРЖАЩЕЙ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ЗАМЕДЛИТЕЛЬ

Одним из параметров, определяющих мощность источника УХН, является плотность потока медленных (<1 эВ) нейтронов, попадающих в источник из замедлителя реактора. Таким образом, предварительным условием для расчета источника является оптимизация этого параметра.

Из рисунков 3 и 4 видно, что в нишу тепловой колонны попадает достаточно большое (10^{10}–10^{11} см$^{-2}$ с$^{-1}$) количество быстрых нейтронов с энергией >1 эВ. Для проверки возможности их замедления в модель вакуумированной ниши тепловой колонны был добавлен дополнительный замедлитель (см. рисунок 5), представляющий собой диск диаметром 1000 мм, толщина которого варьировалась. В качестве материалов замедлителя были рассмотрены вода, тяжелая вода и графит. Расчет плотности потока тепловых нейтронов с энергиями <1 эВ проводился в поперечной области шириной 540–660 мм (область, содержащая ячейки 5, 13, 21…, см. рисунок 2) и на расстоянии от торца ниши, равном толщине замедлителя (т.е. на выходе дополнительного замедлителя).

Результаты расчетов в зависимости от толщины замедлителя представлены на рисунке 6. Цветным линиям соответствуют различные материалы замедлителя: красный – вода, синий – тяжелая вода, фиолетовый – графит. Черной линией обозначена плотность потока, полученная без дополнительного замедлителя в аналогичной области. На рисунке 6 видно, что черная линия находится выше цветных, т.е. присутствие дополнительного замедлителя не приводит к увеличению плотности потока медленных нейтронов. Это связано с тем, что между передней стенкой ниши тепловой колонны и активной зоной находится слой воды, который, по-видимому, уже является оптимальным для получения наибольшей плотности потока медленных нейтронов в нише.

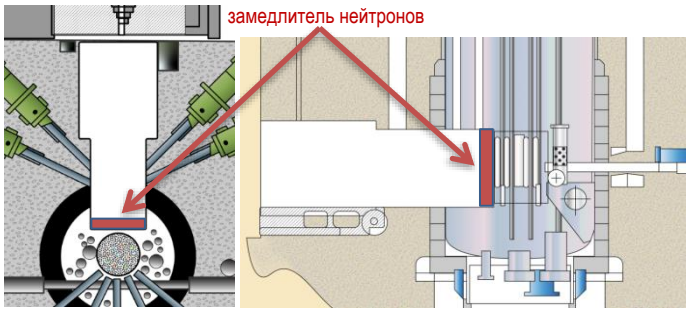


Рисунок 5. Схема расположения дополнительного замедлителя нейтронов в нише тепловой колонны: вид сверху (а) и сбоку (б)

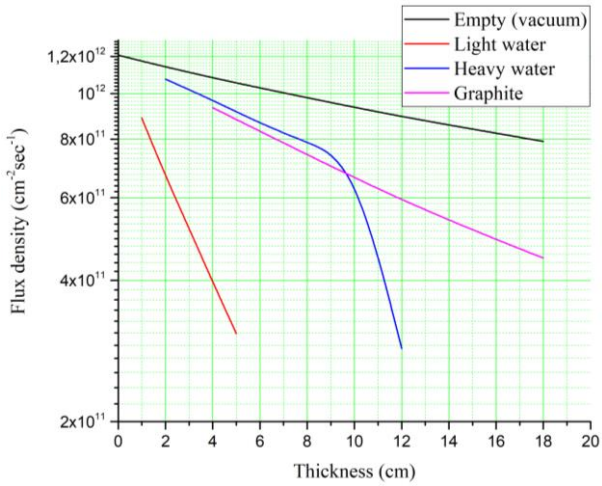


Рисунок 6. Плотность потока медленных нейтронов с энергией <1 эВ в зависимости от толщины замедлителя

Выводы

Ниша тепловой колонны реактора ВВР-К является перспективным местом для размещения высокоинтенсивного источника УХН. Для проектирования источника необходима информация о пространственном и энергетическом распределении нейтронного и гамма-полей в нише. В данной работе нами был проведен соответствующий расчёт. Показано, что максимумы плотностей потоков нейтронов и гамма-квантов располагаются вблизи передней стенки ниши тепловой колонны и по порядку величины достигают ~10^{12} см$^{-2}$ с$^{-1}$. При этом плотность потока быстрых нейтронов (>1 эВ) составляет 10^{10}–10^{11} см$^{-2}$ с$^{-1}$. Для исследования возможности замедления таких нейтронов нами был проведен расчет плотности потока медленных нейтронов в нише тепловой колонны, содержащей дополнительный модератор. Показано, что его наличие не способствует увеличению плотности потока, что объясняется оптимальной толщиной слоя воды, находящегося между передней стенкой ниши тепловой колонны и активной зоной.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках грантового финансирования молодых ученых по научным и научно-техническим проектам № AP19579042.

Литература / References

1. A. A. Shaimerdenov, D. A. Nakipov, F. M. Arinkin, et al. The 50th Anniversary of the WWR-K Research Reactor // Physics of Atomic Nuclei. – 2018. − Vol. 81. − No. 10. − P. 1408–1411.
2. Shaimerdenov A., Gizatulin S., Dyussambayev D., Askerbekov S., Kenzhina I. The WWR-K reactor experimental base for studies of the tritium release from materials under irradiation // Fusion Science and Technology. – 2020. − Vol. 76(3). − P. 304–313.
3. P. Blynskiy, Ye. Chikhray, T. Kulsartov et al. Experiments on tritium generation and yield from lithium ceramics during neutron irradiation // International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. − Vol. 46. − No. 13. − P. 9186–9192.
4. Timur Kulsartov, Asset Shaimerdenov, Zhanna Zaurbekova et al. Features of the in-situ experiments on studying of tritium release from lithium ceramic Li2TiO3 using vacuum extraction method // Fusion Engineering and Design. – 2021. − Vol. 172. − P. 112703.
5. Timur Kulsartov, Yergazy Kenzhin, Regina Knitter et al. Investigation of hydrogen and deuterium impact on the release of tritium from two-phase lithium ceramics under reactor irradiation // Nuclear Materials and Energy. – 2022. − Vol. 30. − P. 101115.
6. V.S. Gnyrya, Yu.I. Tyurin, P.F. Kashaykin et al. A technique for conducting of reactor in-situ tests of optical fibres and FBG-sensors intended for in-vessel applications in thermonuclear facilities // Fusion Engineering and Design. – 2023. − Vol. 191, − P. 113787.
7. Timur Kulsartov, Zhanna Zaurbekova, Yevgen Chikhray Features of Helium and Tritium Release from Li2TiO3 Ceramic Pebbles under Neutron Irradiation // Materials. – 2023. – Vol. 16(17). – P. 5903.
8. Timur Kulsartov, Inesh Kenzhina, Regina Knitter Influence of various gases and water vapors on the processes of tritium release from two-phase lithium ceramics // Fusion Engineering and Design. – 2024. − Vol. 202. − P. 114302.
9. D.S. Sairanbayev, Sh. Kh. Gizatulin, A.N. Gurin et al. Optimizing irradiation conditions for natural molybdenum in WWR-K reactor // Nuclear Engineering and Technology, In Press, Corrected Proof.
10. D. Sairanbayev, S. Koltochnik, A. Shaimerdenov et al. Analysis of lutetium-177 production at the WWR-K research reactor // Applied Radiation and Isotopes. – 2021. − Vol. 169. − P. 109561.
11. D.S. Dyussambayev, M.T. Aitkulov, A.A. Shaimerdenov, et al. TITAN neutron imaging facility performance // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A. – 2022. – 167078.
12. N. K. Romanova, Sh. Kh. Gizatulin, D. S. Sairanbayev et al. Computational study of radiation characteristics in the niche of the experimental devices of the WWR-K reactor // NNC RK Bulletin. – 2022. Issue 3. – P. 88–93. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-3-88-93
13. Goorley J.T., et al., 2013. Initial MCNP6 Release Overview - MCNP6 version 1.0, LA-UR-13-22934.
14. Brown D. A., Chadwick M. B., Capote R., Kahler A. C., Trkov A., Herman M.W. end et. al., 2011. ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data. Nuclear Data Sheets. 112, 2887-2996.
15. Д.С. Сайранбаев, С.Н. Колточник, А.А. Шаймерденов, М.Ш. Тулегенов, Е.А. Кенжин, К. Цучия Динамика изменения эксплуатационных параметров реактора ВВР-К при постепенной замене водяного отражателя на бериллиевый // Известия вузов. Физика. – 2020. – № 12. – Т. 63. – С. 102–113. https://doi.org/10.17223/00213411/63/12/102 [D.S. Sayranbaev, S.N. Koltochnik, A.A. Shaymerdenov, M.Sh. Tulegenov, E.A. Kenzhin, K. Tsuchiya Dinamika izmeneniya ekspluatatsionnykh parametrov reaktora VVR-K pri postepennoy zamene vodyanogo otrazhatelya na

berillievyy // Izvestiya vuzov. Fizika. – 2020. – No. 12. – Vol. 63. – P. 102–113.] (In Russ.)
16. D. Sairanbayev, S. Koltochnik, A. Shaimerdenov, Y. Chakrova, A. Gurin, Y. Kenzhin Analysis of lutetium-177 production at the WWR-K research reactor // Applied radiation and isotopes. – Vol. 169. – 2021. – P. 109561. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109561
17. Чекушина Л.В., Колточник С.Н., Сайранбаев Д.С., Гизатулин Ш.Х., Шаймерденов А.А., Накипов Д.А., Кенжин Е.А. Опыт эксплуатации ВВР-К с бериллиевым отражателем и низкообогащенным урановым топливом // Атомная энергия. – 2021. – Т. 130. – № 5. – С. 295–298. [Chekushina L.V., Koltochnik S.N., Sayranbaev D.S., Gizatulin Sh.Kh., Shaymerdenov A.A., Nakipov D.A., Kenzhin E.A. Opyt ekspluatatsii VVR-K s berillievym otrazhatelem i nizkoobogashchennym uranovym toplivom // Atomnaya energiya. – 2021. – Vol. 130. – No. 5. – P. 295–298.] (In Russ.)
18. Айткулов М.Т., Дюсамбаев Д.С., Аханов А.М., Киселев К.С., Бұғыбай Ж.Т., Романова Н.К., Гизатулин Ш.Х., Шаймерденов А.А., Накипов Д.А. Анализ возможности радиационного окрашивания топазов в реакторе ВВР-К // Вестник КазНУ. Серия Физическая (ВКФ). – 2021. – Вып 4 (79). – С. 42–48. https://doi.org/10.26577/RCPh.2021.v79.i4.06 [Aytkulov M.T., Dyusambaev D.S., Akhanov A.M., Kiselev K.S., Bұғybay Zh.T., Romanova N.K., Gizatulin Sh.Kh., Shaymerdenov A.A., Nakipov D.A. Analiz vozmozhnosti radiatsionnogo okrashivaniya topazov v reaktore VVR-K // Recent Contributions to Physics. – 2021. – Issue 4 (79). – P. 42–48.] (In Russ.)
19. A. Shaimerdenov, D. Sairanbayev, D. Dyussambayev, S. Gizatulin, D. Nakipov, Z. Bugubay Computational analysis of a neutron trap in the center of the WWR-K reactor core for irradiation tests of large-sized objects // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials. – Vol. 6. – 2022. – p.38-46. https://doi.org/10.32523/ejpfm.2022060104
20. А.А. Шаймерденов, А.М. Аханов, Д.С. Сайранбаев, М.Т. Айткулов, К.С. Киселев, Ж.Т. Буғыбай, М.С. Мережко, А.Т. Мухамеджанова Расчетное обоснование экспериментов по облучению литиевой керамики в реакторе ВВР-К // Вестник КазНУ. Серия Физическая (ВКФ). – 2022. – Вып. 3 (82). – С. 27–36. https://doi.org/10.26577/RCPh.2022.v82.i3.05 [Shaimerdenov, A., Akhanov, A., Sairanbayev, D., Aitkulov, M., Kisselyov, K., Bugybay, Z., Merezhko, M., & Mukhamejanova, A. (2022). Raschetnoe obosnovanie eksperimentov po oblucheniyu litievoy keramiki v reaktore VVR-K // Recent Contributions to Physics. – 2022. – Issue 3 (82). P. 27–36.] (In Russ.)
21. A.M. Akhanov, M.T. Aitkulov, D.S. Sairanbayev, Sh.Kh Gizatulin, N.K. Romanova, A.A. Shaimerdenov, Y.V. Chikhray, Zh Ualzhanov, T.K. Zholdybayev Irradiation capsule design for neutron coloration of topaz in a WWR-K reactor // Applied Radiation and Isotopes. – 2022. – Vol. 190. – P. 110472. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110472

УЛЬТРА СУЫҚ НЕЙТРОНДАР КӨЗІН ОРНАЛАСТЫРУ ОРНЫ РЕТІНДЕ ҚАРАСТЫРЫЛАТЫН ССР-Қ ЗЕРТТЕУ РЕАКТОРЫНЫҢ ЖЫЛУ БАҒАНЫНЫҢ ТЕКШЕСІНДЕГІ НЕЙТРОНДЫҚ ЖӘНЕ ГАММА ӨРІСТЕРІН ЕСЕПТЕУ

Қ. Тұрлыбекұлы[1,2*], А. А. Шаймерденов[1], Д. С. Сайранбаев[1], Д. Шапиро[1], Б. Мұхаметұлы[2], О. Баяхметов[1], С.К. Сахиев[1]

[1] ҚР ЭМ «Ядролық физика институты» РМК, Алматы, Қазақстан
[2] Біріккен ядролық зерттеулер институты, Дубна, Ресей

** Байланыс үшін E-mail: k.turlybekuly@inp.kz*

ССР-Қ (Су-Су Реакторы-Қазақстан) төмен байытылған уран (ТБУ) отынына өтуіне байланысты күрделі жаңғыртудан кейін қайта іске қосылды және 2016 жылғы қыркүйектен бастап (ТБУ) отынымен жұмыс істейді. 1967 жылы салынған реактор заманауи қауіпсіздік талаптарына сәйкес айтарлықтай жаңартылды. Қазақстандағы нейтрондардың бұл маңызды көзі физика, химия, биология, материалтану саласындағы іргелі және қолданбалы зерттеулер, сондай-ақ материалдарды радиациялық өңдеу және радиоизотоптар өндіру сияқты әртүрлі мақсаттарға қызмет етеді. Ол кадрларды даярлау үшін де қолданылады. ССР-Қ реакторының базасында эксперименттік станциялардың базалық жиынтығын орнатуға мүмкіндік беретін қондырғы жасау жобаларын іске қосу жоспарлануда. Зерттеу мүмкіндіктерін кеңейтетін ультра суық нейтрондардың (УСН) көзін құру үшін айтарлықтай күш жұмсалады. Ол үшін жылу бағанының текшесін – 1000 мм-ге дейінгі объектілерді сәулелендіруге мүмкіндік беретін үлкен диаметрлі көлденең арнаны пайдалану ұсынылады. Сонымен қатар, жылу бағанының текшесінде төрт радиалды канал бар, оларды суық (10^{-6}–10^{-3} эВ) және өте суық (10^{-7}–10^{-6} эВ) нейтрондарды шығару үшін пайдалануға болады. Мақалада ССР-Қ реакторының жылу бағанының текшесінде ағымдағы және қосымша модераторы бар конфигурациялары үшін нейтрондық және гамма өрістерінің кеңістіктік және энергетикалық таралуының есептеулері келтірілген. Қосымша модераторы бар конфигурация баяу (<1 эВ) нейтрондық өрістердің ұлғаюына әкелмейтіні көрсетілген және ағымдағы модератордың қалыңдығы оңтайлы болып есептеледі.

***Түйін сөздер**: ССР-Қ реактор, нейтрондар, гамма кванттар, жылу бағанының текшесі, нейтрондық модератор, MCNP.*

CALCULATION OF NEUTRON AND GAMMA FIELDS IN THE NICHE OF THE THERMAL COLUMN OF THE WWR-K RESEARCH REACTOR, CONSIDERED AS THE LOCATION OF THE ULTRACOLD NEUTRON SOURCE

K. Turlybekuly[1,2*], A. A. Shaimerdenov[1], D. S. Sairanbayev[1], D. Shapiro[1], B. Mukhametuly[2], O. Bayakhmetov[1], S. K. Sakhiyev[1]

[1] RSE "Institute of Nuclear Physics" ME RK, Almaty, Kazakhstan
[2] Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

** E-mail for contacts: k.turlybekuly@inp.kz*

WWR-K (Water-Water Reactor - Kazakhstan) was restarted after a major modernization related to its conversion to low enriched uranium (LEU) fuel and has been operating on LEU fuel since September 2016. The reactor, built in 1967, has been significantly modernized to meet modern safety requirements. This important neutron source in Kazakhstan serves various purposes, such as basic and applied research in physics, chemistry, biology, materials science, as well as for radiation treatment of materials and production of radioisotopes. It is also used for training. Instrumentation projects are planned to be launched on the basis of the WWR-K reactor to install a basic set of experimental stations. Significant efforts will be made to develop an ultracold neutron (UCN) source, which will expand research capabilities. For this purpose, it is proposed to use the niche of thermal column, a large diameter horizontal channel that allows irradiation of objects up to 1000 mm in size. In addition, the niche of thermal column has four radial channels that can be used to extract cold (10^{-6}–10^{-3} eV) and very cold (10^{-7}–10^{-6} eV) neutrons. The paper presents calculations of spatial and energy distributions of neutron and gamma fields for the current and for the additional moderator configuration of the niche of thermal column of the WWR-K reactor. It is shown that the configuration with additional moderator does not lead to an increase in the slow neutron fields (<1 eV), and the existing moderator thickness is optimal.

***Keywords**: WWR-K reactor, neutrons, gamma quanta, niche of thermal column, neutron moderator, MCNP.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-56-64
УДК 621.039.53

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ХАРАКТЕР РАДИАЦИОННОГО РАЗОГРЕВА МАТЕРИАЛОВ В ИМПУЛЬСНОМ ГРАФИТОВОМ РЕАКТОРЕ

Р. Е. Келсингазина[1,2*], В. А. Витюк[1], Г. А. Витюк[1], Н. Е. Мухамедов[1], С. А. Должиков[1]

[1] Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан
[2] Университет имени Шакарима города Семей, Семей, Казахстан

** E-mail для контактов: kelsingazina@nnc.kz*

Ужесточение требований к методическому обеспечению внутриреакторных экспериментов определяет необходимость повышения качества прогнозирования важных с точки зрения безопасности параметров облучаемых экспериментальных устройств. Для качественного прогнозирования температуры элементов устройств при их облучении в реакторе ИГР в данной работе представлен анализ механизмов радиационного разогрева под воздействием нейтронного и гамма-полей реактора. Проведены расчеты по определению вклада различных нейтронно-физических процессов в результирующий радиационный разогрев образцов конструкционных материалов при их планируемом облучении в реакторе ИГР, определено объемное распределение энерговыделения в образцах конструкционных материалов.

Ключевые слова: *радиационный разогрев, конструкционные материалы, нейтронно-физические расчеты, компьютерное моделирование, энерговыделение.*

Введение

База данных МАГАТЭ по исследовательским реакторам (Research Reactor Database – RRDB) [1] содержит данные по 840 реакторам в 70 странах мира. Однако, из них не более 30 могут быть использованы для экспериментальных исследований твэлов и ТВС ядерных реакторов. И лишь единицы из них являются импульсными системами, обладающие уникальными возможностями для испытаний топлива ядерных реакторов в переходных и аварийных режимах эксплуатации. Импульсные исследовательские реакторы обеспечивают контролируемое, заранее заданное выделение энергии для моделирования аварий в топливе и, таким образом, демонстрируют параметры безопасности новых типов ядерного топлива, разработанных для существующих коммерческих реакторов и инновационных ядерных установок.

Самым ярким представителем среди импульсных исследовательских реакторов, который эксплуатируется уже продолжительное время, является графитовый реактор ИГР, находящийся в Национальном ядерном центре Республики Казахстан [2]. Экспериментальные исследования и испытания, которые проводятся на реакторе ИГР, практически всегда связаны с получением экспериментальной информации о быстропротекающих физических и тепловых процессах в ядерных реакторах, о работоспособности объектов испытаний в нормальных и аварийных условиях эксплуатации, о поведении топлива и конструкционных материалов для обоснования безопасности систем и элементов ядерных энергетических установок [3].

На данный момент методология подготовки и проведения реакторных испытаний на ИГР позволяет обеспечивать качественное определение необходимых параметров испытаний в ИГР. Однако с ростом сложности и представительности испытаний в ИГР возникают все новые требования к их методическому обеспечению.

Все проводимые испытания, будь это физический, методический или исследовательский эксперимент, сопровождаются расчетным обоснованием условий их безопасного проведения. Соответственно, необходимо повышение качества расчетного прогнозирования параметров внутриреакторных экспериментов с экспериментальными устройствами.

Уровень энерговыделения в конструкционных материалах экспериментальных устройств при облучении в ИГР традиционно определяется, в первую очередь, энерговыделением в топливных элементах, присутствующих в объектах испытаний. Этот параметр является ключевым и вносит наибольший вклад в разогрев экспериментального устройства в ходе реакторного эксперимента. Энерговыделение в топливных элементах зависит от параметров нейтронного поля в экспериментальном канале и размерно-материальных характеристик самого экспериментального устройства. Спектр и форма нейтронного поля реактора сами по себе сильно зависят от целого ряда факторов: температуры активной зоны, положения регулирующих стержней, конфигурации и материального состава облучательного устройства.

Помимо этого, при проведении любого внутриреакторного эксперимента на ИГР также следует учитывать воздействие фотонного и корпускулярного излучения на другие конструкционные материалы экспериментальных устройств, которое приводит к их радиационному разогреву. Данный фактор важно учитывать с точки зрения прогнозирования теплового состояния устройств в ходе эксперимента. Радиационный разогрев может происходить за счет различных нейтронно-физических процессов в той или

иной мере, вносящих свой вклад в результирующий разогрев материала. Из-за практически единовременного и комплексного воздействия затруднительно получить эти данные посредством физического измерения, поэтому определяющим инструментом, для определения истинных значений радиационного разогрева конструктивных элементов экспериментального устройства, является компьютерное моделирование [4].

Таким образом, для корректного определения параметров радиационного разогрева конструкционных материалов, используемых при облучении в реакторе ИГР, необходим анализ составных нейтронно-физических процессов. Вместе с тем, важно определить объемное распределение энерговыделения, вызванного радиационным разогревом в конструкционных материалах. Это связано с необходимостью получения корректной информации о распределении температуры в объеме образцов при исследовании быстропротекающих процессов, обусловленных импульсными режимами испытаний. Особенно данный фактор имеет значение для материалов с низкой теплопроводностью. С практической точки зрения понимание объемного распределения энерговыделения важно при интерпретации показаний средств измерения температуры, установленных в образцах, и определении точек и способов их крепления на образцах.

В данной работе представлено описание основных механизмов радиационного разогрева конструкционных материалов при их облучении в реакторе ИГР, методика и результаты оценки вклада различных процессов, а также объемного распределения энерговыделения.

Механизмы радиационного разогрева конструкционных материалов ядерных реакторов

Радиационный разогрев происходит во всех элементах реактора, а в случае наличия дополнительных облучательных устройств, и в их конструкциях. Разогрев в топливе, в основном, обусловлен локальным поглощением кинетической энергии осколков деления Q_{fp}. А такие компоненты как нейтронное и гамма-излучение уносятся далеко от места рождения и разогревают конструктивные элементы реактора [5], т.е. их влияние происходит более «глобально» в конструктивных элементах реактора. Их в свою очередь можно поделить на мгновенные Q_p и запаздывающие Q_d компоненты излучения.

Источниками мгновенных нейтронов являются насыщенные нейтронами осколки деления, нейтроны теряют энергию при упругих и неупругих рассеяниях, а также вследствие поглощения в ядерных реакциях превращения [6]. Радиационный разогрев конструкционных материалов за счет поглощения нейтронов происходит преимущественно в результате реакции (n, γ), при которой в конструктивных элементах происходит самопоглощение образовавшихся в них гамма-квантов. Такие нейтронные реакции превращения, как (n, α), (n, p) и т.д., являются пороговыми и, в значительной степени, свойственны определенным материалам, которые не рассматриваются в данной работе. Вкладом энергии гамма-квантов, образовавшихся при неупругом рассеянии нейтронов, можно пренебречь, поскольку данная реакция происходит, преимущественно, на тяжелых ядрах и составляет меньше 1% в сравнении с реакцией радиационного захвата нейтронов.

Источниками внешнего мгновенного гамма-излучения для конструкционных материалов являются реакторные гамма-кванты (в нашем случае это гамма-кванты реактора ИГР – γ-IGR), испущенные практически мгновенно при делении ядра топливных материалов активной зоны и рожденные в реакциях захвата нейтронов (n, γ).

При распаде продуктов деления также образуются бета-частицы Q_β, но в связи с малой длиной пробега в веществе можно считать, что они поглощаются локально в месте образования. При β-распадах осколков деления образовавшиеся ядра все еще находятся в возбужденном состоянии, снятие которого происходит путем испускания гамма-квантов и, в редких случаях, нейтронов, являющихся источниками запаздывающего излучения Q_d. К ним также можно отнести распад продуктов активации конструкционных элементов реактора, образовавшиеся в результате захвата нейтронов.

Таким образом полное энерговыделение радиационного разогрева Q_{tot} можно записать следующим образом:

$$Q_{tot} = Q_{fp} + Q_n + Q_{\gamma p} + Q_{\gamma c} + Q_\beta + Q_d$$

где Q_{fp} – энерговыделение за счет кинетической энергии осколков деления ядра; Q_n – энерговыделение за счет энергии мгновенных нейтронов; $Q_{\gamma p}$ – энерговыделение за счет энергии мгновенного гамма-излучения образовавшегося при делении ядра топливных материалов; $Q_{\gamma c}$ – энерговыделение за счет энергии мгновенного гамма-излучения, образовавшегося при захвате нейтронов в реакции (n, γ); Q_β – энерговыделение за счет энергии β-частиц, образовавшихся при распаде продуктов деления; Q_d – энерговыделение за счет энергии запаздывающего излучения.

В таблице 1 представлены пространственное распределение всех видов выделяющейся энергии [7, 8].

В радиационном разогреве конструкционных материалов целесообразно учитывать вклад «глобальных» видов излучения. Локальными видами можно пренебречь:

$$Q_{tot(\text{конструктивных материалов})} = Q_n + Q_{\gamma p} + Q_{\gamma c} + Q_d$$

Даже используя понятие «мгновенности», вклад различных процессов все же происходит со сдвигом по времени [9, 10], которое можно представить в виде шкалы, изображенной на рисунке 1.

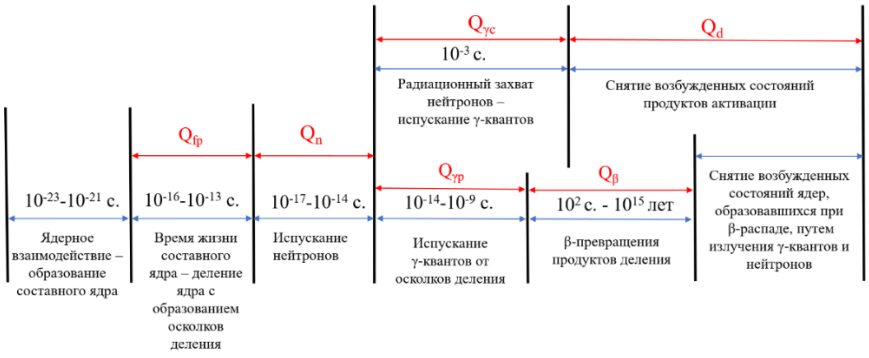


Рисунок 1. Время протекания нейтронно-физических процессов

Таблица 1. Пространственное распределение различных видов излучения

Энергия	Длина пробега несущих энергию частиц	Поглощение
Q_{fp}	миллиметры	локальное
$\boldsymbol{Q_n}$	**1 см – 10 см**	**глобальное**
$\boldsymbol{Q_{\gamma p}}$	**10 см – 1 м**	**глобальное**
$\boldsymbol{Q_{\gamma c}}$	**10 см – 1 м**	**глобальное**
Q_β	миллиметры	локальное
$\boldsymbol{Q_d}$	**10 см – 1 м**	**глобальное**

В этой связи, определение вклада различных нейтронно-физических процессов в радиационный разогрев конструкционных материалов является актуальной задачей. Особенно данный вопрос является важным при учете теплового состояния реакторов (а также облучательных устройств, расположенных в них), работающих в импульсных режимах, в первую очередь, для реакторов, обладающих короткой полушириной импульса.

Схема эксперимента

Нейтронно-физические расчеты проведены в рамках подготовки к экспериментальным исследованиям радиационного разогрева конструкционных материалов ядерной и термоядерной техники при их облучении на реакторе ИГР [11, 12].

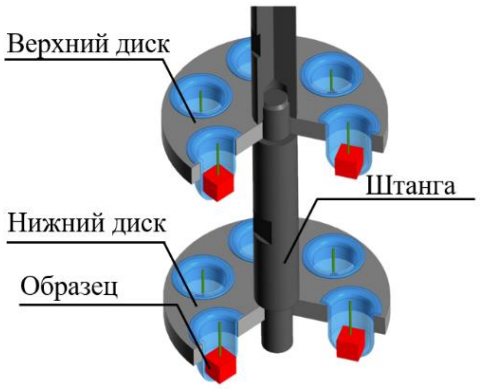


Рисунок 2. Испытательная секция экспериментального устройства

Экспериментальное устройство для исследования параметров радиационного разогрева представляет собой ампулу с крышкой, обеспечивающих вакуумную среду, в которую помещается испытательная секция (рисунок 2). Испытательная секция состоит из штанги и двух алюминиевых дисков с шестью отверстиями для размещения исследуемых образцов конструкционных материалов.

При размещении экспериментального устройства в центральном экспериментальном канале реактора оба диска испытательной секции равноудалены от центрального горизонтального сечения активной зоны ИГР, за счет чего обеспечиваются практически идентичные параметры облучения образцов.

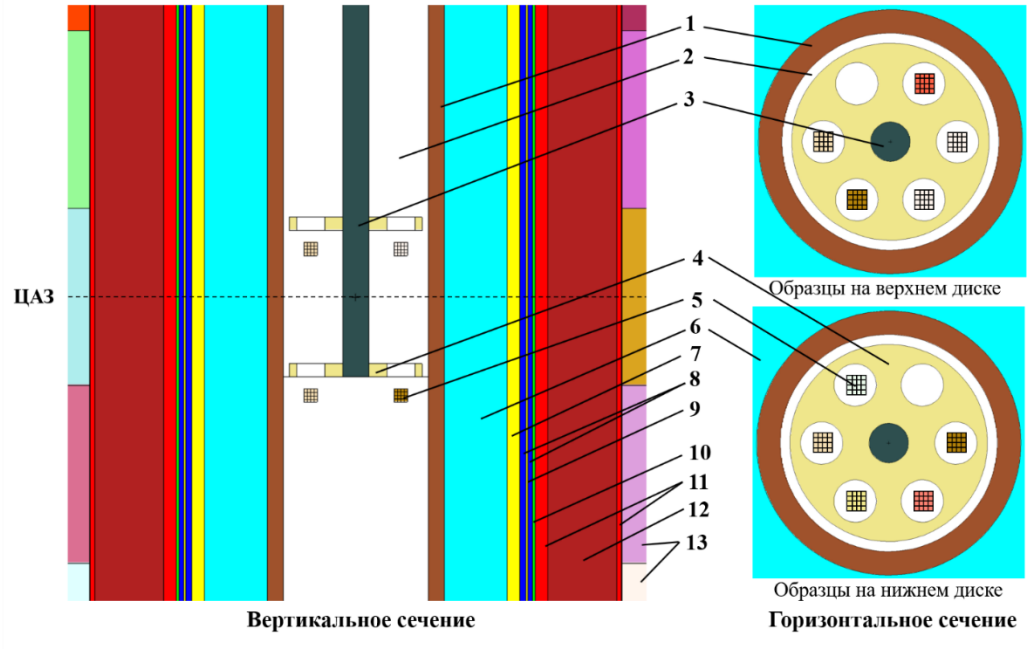
Все образцы материалов выполнены в виде куба со стороной 10 мм. Перечень исследуемых материалов представлен в таблице 2. При выборе исследуемых материалов предпочтение было отдано материалам, используемым при создании внутриреакторных экспериментальных устройств. Планируемый режим работы ИГР в испытаниях – вспышка с максимальной мощностью реактора при проведении экспериментов с первым набором образцов – 10 ГВт, а со вторым набором образцов – 1,2 ГВт.

Таблица 2. Материалы образцов в экспериментах

1-ый набор образцов (Эксперимент 1)		2-ой набор образцов (Эксперимент 2)	
№	Материал образца	№	Материал образца
1	Сплав АМг-6	1	Никель
2	Алюминий АМг1	2	Медь
3	12Х18Н10Т	3	Тантал
4	12Х1МФ	4	Молибден
5	Титан	5	Свинец
6	12ХН35ВТ	6	Вольфрам

Расчетное моделирование

Моделирование экспериментального устройства (рисунок 3), помещенного в центральный экспериментальный канал (ЦЭК) ИГР [13], проводилось в программе MCNP6 [14] с библиотекой ENDF/B-VII в соответствии со всеми размерно-материальными характеристиками устройства. Исследуемые образцы при моделировании были поделены на 64 геометрически равные части.



1 – ампула, 2 – вакуумная среда, 3 – штанга, 4 –диск, 5 – образец, 6 – воздух, 7 – внутренний кожух неподвижной ампулы (НА) ЦЭК, 8 – водяной контур, 9 – разделительный кожух НА ЦЭК, 10 – наружный кожух НА ЦЭК, 12 – гелиевая среда, 13 – графитовые блоки, пропитанные солью урана

Рисунок 3. Нейтронно-физическая модель экспериментального устройства с первым набором образцов

Для определения мгновенного энерговыделения исследуемых образцов в коде MCNP можно использовать карту F6, позволяющую рассчитать разогрев за счет мгновенных нейтронов Q_n (F6:n) и гамма-квантов Q_γ (F6:p). При этом Q_γ можно разделить на следующие составляющие:

$$Q_\gamma = (Q_{\gamma p-IGR} + Q_{\gamma c-IGR}) + Q_{\gamma c-\text{образец}} = \\ = Q_{\gamma-IGR} + Q_{\gamma c-\text{образец}},$$

где $Q_{\gamma-IGR} = Q_{\gamma p-IGR} + Q_{\gamma c-IGR}$ – энерговыделение за счет энергии реакторных гамма-квантов, образовавшихся в реакции деления и радиационного захвата; $Q_{\gamma c-образец}$ – энерговыделение за счет энергии гамма-квантов, образовавшихся в образце при захвате нейтронов.

Карта F6 описывается уравнением [15]:

$$F6\left[\frac{\text{МэВ}}{\text{г}\cdot(1\text{ нейтрон деления})}\right] = \\ = \frac{\rho_a}{m}\int_V\int_t\int_E \sigma_T(E)H(E)\phi(r,E,t)\,dEdtdV,$$

где, ρ_a – атомная плотность, атом/барн·см; m – масса, г; σ_T – полное сечение взаимодействия нейтронов с веществом, барн; $H(E)$ – энергия, МэВ/столкновение; $\phi(r,E,t)$ – поток частиц, см$^{-2}$·с$^{-1}$·МэВ$^{-1}$.

Поскольку размерность полученных значений выдается на один нейтрон деления, то необходимо произвести умножение на величину нормировочного коэффициента. В программе MCNP можно провести нормировку двумя способами, в первом способе необходимо определить мощность источника, как количество рожденных нейтронов в секунду:

$$S\left[\frac{\text{Вт}\cdot\text{нейтроны деления}}{\text{МэВ / деление}}\right] = \frac{P}{Q_T}\frac{\nu}{k_{eff}},$$

где P – мощность реактора, Вт; Q_T – средняя энергия, выделяющаяся при делении, МэВ/деление; ν/k_{eff} – среднее число рожденных нейтронов при делении.

Таким образом, можно найти Q_γ и Q_n, используя соответствующую величину F6:

$$Q[\text{Вт}] = (F6)\left[\frac{\text{МэВ}}{\text{г}\cdot(1\text{ нейтрон деления})}\right]\cdot \\ \cdot m[\text{г}]\cdot S\left[\frac{\text{Вт}\cdot\text{нейтроны деления}}{\text{МэВ / деление}}\right].$$

Чтобы определить вклад только гамма-квантов, образовавшихся в образце в результате захвата нейтрона, можно использовать карту F4 и FM, описываемую формулой [15]:

$$F4-FM\left[\frac{\text{н}\cdot\text{барн}\cdot\text{см}}{1\text{ нейтрон деления}}\right] = \\ = \frac{1}{V}\int_V\int_t\int_E \sigma_T(E)\phi(r,E,t)\,dEdtdV.$$

Функционал FM, позволяет выбрать необходимую реакцию, в результате значение потока F4 умножается на сечение соответствующей реакции. Для

получения числа реакций на один рожденный нейтрон, полученную величину $F4-FM$ надо умножить на атомную плотность:

$$RCRR\left[\frac{\text{кол}-\text{во реакций}}{1\text{ нейтрон деления}}\right]=$$

$$=F4-FM\left[\frac{\text{н}\cdot\text{барн}\cdot\text{см}}{1\text{ рожденный нейтрон}}\right]\cdot\rho_a\left[\frac{\text{атомы}}{\text{барн}\cdot\text{см}}\right].$$

Зная энергетический выход реакции захвата H [16], можно получить значение энерговыделения, обусловленного радиационным захватом нейтронов в образце:

$$Q_{\gamma\text{с}-\text{образца}}\left[\text{Вт}\right]=RCRR\left[\frac{\text{кол}-\text{во реакций}}{1\text{ нейтрон деления}}\right]\cdot$$

$$\cdot H\left[\text{МэВ}\right]\cdot S\left[\frac{\text{Вт}\cdot\text{нейтроны деления}}{\text{МэВ}/\text{деление}}\right].$$

Вклад внешних реакторных гамма-квантов γ-IGR в результирующий разогрев образца определим из разности:

$$Q_{\gamma-IGR}=Q_{\gamma}-Q_{\gamma\text{с}-\text{образца}}\ .$$

Для определения вклада запаздывающего излучения необходимо будет провести дополнительный расчет и во входном файле с использованием F6:n,p добавить карту ACT, учитывающую запаздывающее нейтронное и гамма-излучение. И быстрее будет, если воспользуемся вторым способом нормировки, при котором необходимо провести расчеты энерговыделения в реакторе с использованием той же карты F6:n,p. В результате из отношения энерговыделения в интересующем объеме (образце) к энерговыделению в реакторе получаем безразмерную величину x :

$$x=\frac{\left(F6:n,p\right)\left[\dfrac{\text{МэВ}}{\text{г}\cdot\left(1\text{ нейтрон деления}\right)}\right]_{\text{образец}}}{\left(F6:n,p\right)\left[\dfrac{\text{МэВ}}{\text{г}\cdot\left(1\text{ нейтрон деления}\right)}\right]_{\text{ИГР}}}.$$

Умножив величину x на соответствующую величину мощности реактора, получим величину энерговыделения в Вт. Тогда вклад запаздывающего энерговыделения определяется как:

$$Q_d=(x_{ACT}-x)\cdot P.$$

Результаты нейтронно-физических расчетов

Результаты нейтронно-физических расчетов в графическом виде представлены на рисунках 4–5.

Энерговыделение за счет рассеяния нейтронов Q_n вносит меньше 1% энергии в радиационный разогрев образцов, и только для легких ядер, таких как алюминий, вклад составляет около 7%. Таким образом, наибольший вклад в радиационный разогрев вносят мгновенные реакторные гамма-кванты γ-IGR и гамма-кванты, образовавшиеся в результате радиационного захвата нейтронов в материале образца. При этом в образцах свинца и алюминия с маленьким сечением захвата нейтронов, вклад $Q_{\gamma\text{с}}$ минимальный.

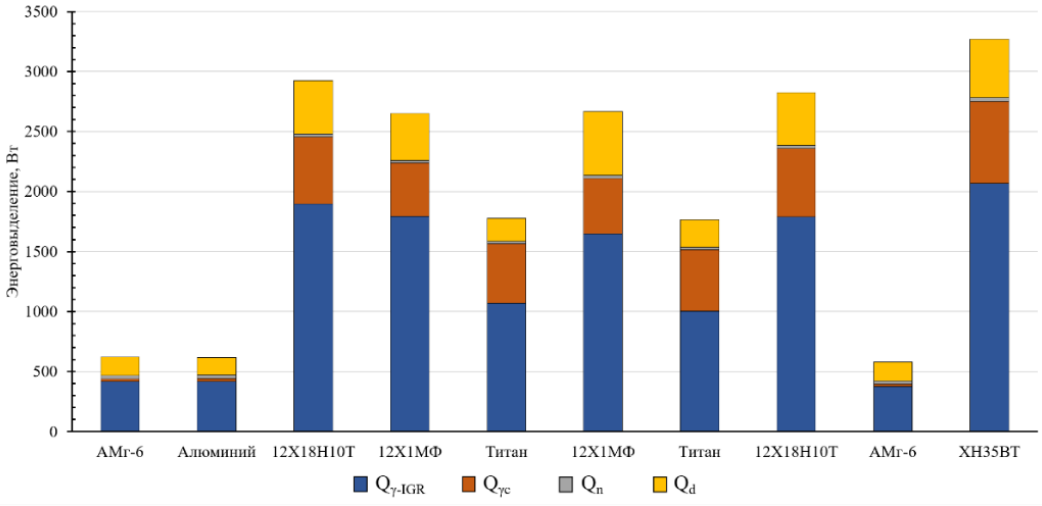


Рисунок 4. Вклад нейтронно-физических процессов в результирующий радиационный разогрев первого набора образцов

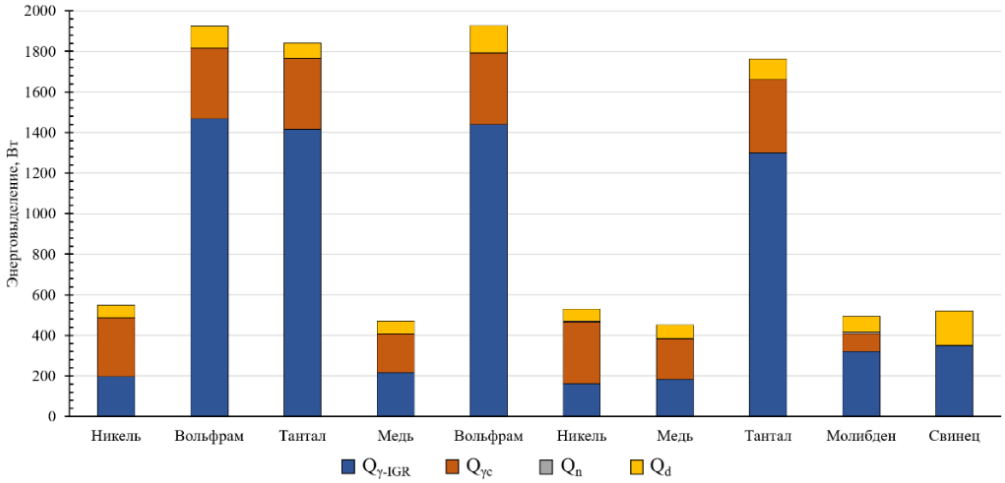


Рисунок 5. Вклад нейтронно-физических процессов в результирующий радиационный разогрев второго набора образцов

Объемное распределение энерговыделения в образце

Как было описано ранее, объем образцов был поделен для выделения внешних и внутренних слоев, 56 частей составили наружную поверхность и 8 частей – внутренний слой образца (рисунок 6).

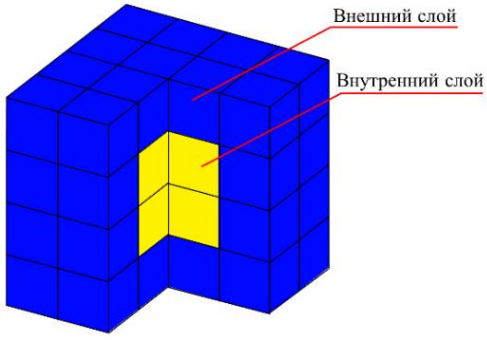


Рисунок 6. Модель образца

Результаты объемного распределения энерговыделения в образцах за счет мгновенной компоненты излучения представлены на рисунках 7–8.

Доля γ-квантов, провзаимодействовавших на единице длины пути в образце, так называемый линейный коэффициент ослабления μ, зависит от энергии гамма-квантов E_γ, плотности вещества мишени ρ и порядкового номера вещества Z: $\mu = f(E_\gamma, \rho, Z)$ [17]. При радиационном захвате, образец сам становится источником γ-квантов, которые могут в нем рассеяться (отдавая энергию) или вылететь из него. При этом $Q_{\gamma\text{-}IGR}$ зависит от μ, а $Q_{\gamma c}$ – от сечения (n,γ) и энергии выхода реакции захвата H. Таким образом, почти все образцы больше разогреваются внутри, только образец свинца из-за большого значения μ и маленького сечения захвата нейтронов больше разогревается снаружи. Образцы, содержащие алюминий, из-за малого коэффициента μ, разогреваются равномерно, а из-за малого сечения захвата нейтронов вклад $Q_{\gamma c}$ очень мал.

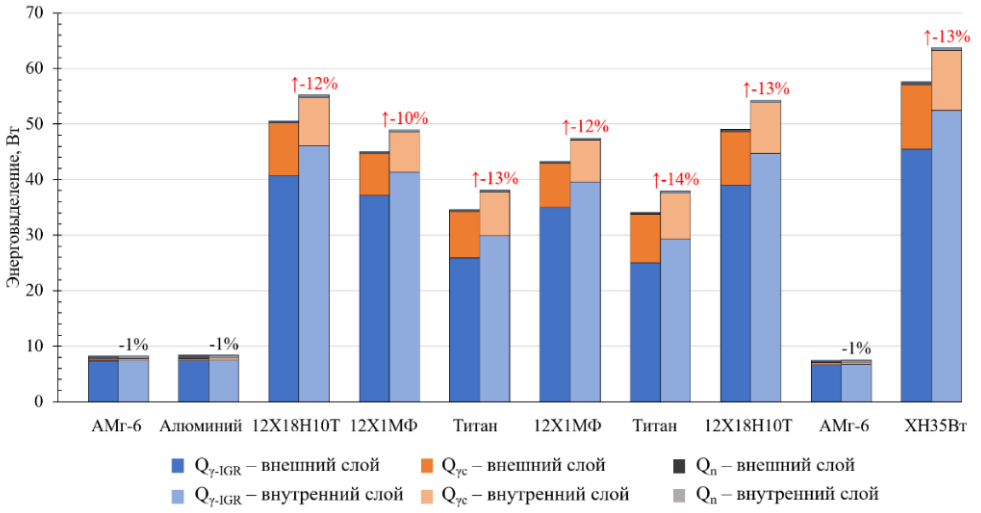


Рисунок 7. Сравнение среднего значения энерговыделения одной части внешнего и внутреннего слоя первого набора образцов

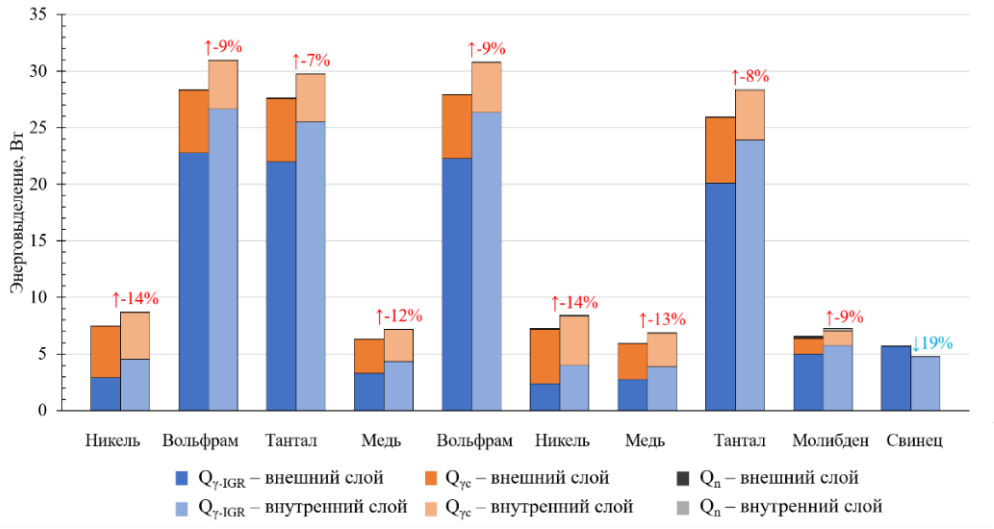


Рисунок 8. Сравнение среднего значения энерговыделения одной части внешнего и внутреннего слоя второго набора образцов

Заключение

Представлено описание нейтронно-физических процессов, определяющих характер радиационного разогрева материалов, и методика проведения соответствующих расчетов с использованием программы MCNP. В результате нейтронно-физических расчетов с использованием прецизионных расчетных моделей были определены вклады различных процессов в результирующий радиационный разогрев конструкционных материалов. Было проведено сравнение объемного распределения энерговыделения исследуемых образцов с учетом процессов, вносящих наибольший вклад в радиационный разогрев.

Результаты данной работы будут использованы при постановке экспериментов на реакторе ИГР по исследованию радиационного разогрева конструкционных материалов ядерной и термоядерной техники.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по теме BR21882185 «Исследования в поддержку создания и безопасного функционирования атомной электростанции в Республике Казахстан».

Литература

1. Research Reactors Database (RRDB) // http://nucleus.iaea.org/RRDB.
2. Batyrbekov E., Vityuk V., Vurim V., Vityuk G. Experimental opportunities and main results of the impulse graphite reactor use for research in safety area // Annals of Nuclear Energy. – 2023. – Vol. 182. – P. 109582. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109582
3. Батырбеков Э.Г., Вурим А.Д., Гайдайчук В.А., Витюк В.А. Импульсный графитовый реактор: опыт эксплуатации и применения для испытаний твэлов и ТВС: Монография – ООИ «Ишим». – 2023. – 208 с.
4. Kelsingazina R., Vityuk V., Vurim A., Vityuk V., Mukhamedov N., Tikhomirov G. Computational approaches for determining the nuclear heating value of structural materials during the irradiation at the IGR reactor // Annals of Nuclear Energy. – 2024. – Vol. 204. – P. 110532. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110532
5. Глушков Е.С., Демин В.Е., Пономарев-Степной Н.Н., Хрулев А.А. Тепловыделение в ядерном реакторе. – М.: Энергоатомиздат. – 1985. – 160 с.
6. Бартоломей Г.Г., Бать Г.А., Байбаков В.Д., Алхутов М.С. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов. Учебное пособие для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, – 1989. – 512 с.
7. Jurbandam Linina. Calculation of the fission q-value and spatial energy deposition in the SAFARI-1 nuclear reactor. University of the Witwatersrand, Johannesburg. – 2018. https://hdl.handle.net/10539/26701
8. Brown Forrest B., Mosteller Russell D., Martin William R. Monte Carlo – Advances and Challenges. Switzerland: Paul Scherrer Institut (PSI). – 2008.
9. Стогов Ю.В. Основы нейтронной физики: Учебное пособие. – М.: МИФИ. – 2008. – 204 с.
10. Климов А.Н. Ядерная физика и ядерные реакторы: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат. – 1985. – 350 с.
11. Мухамедов Н.Е., Витюк Г.А., Келсингазина Р.Е., Должиков С.А., Богомолова И.Н. Расчетное обоснование экспериментов по исследованию радиационного разогрева материалов в реакторе ИГР. // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник тезисов докладов XI Международной научно-практической конференции. Томский политехнический университет. – Томск: Томский политехнический университет. – 2022. – с. 53
12. Мухамедов Н.Е., Витюк Г.А., Келсингазина Р.Е., Должиков С.А., Богомолова И.Н. Определение режимов реакторных исследований радиационного разогрева материалов ядерной и термоядерной техники. // Вестник ВКТУ. – 2022. –№ 4 – с. 167–179. https://doi.org/10.51885/1561-4212_2022_4_167

13. 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.
14. Pelowitz D., Fallgren A., McMath G. MCNP6 User's Manual Code Version 6.1.1 Beta. Report LA-CP-14-00745. – 2014.
15. X-5 Monte Carlo Team. MCNP – a General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume I: Overview and Theory: LA-UR-03-1987. Los Alamos National Laboratory. – 2003.
16. Wang M. et. al. The AME2016 atomic mass evaluation (II). Tables, graphs and references // Chinese Phys. C. – 2017. – Vol. 41. – No. 3.
17. Hubbell J. H. Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients, and Energy Absorption Coefficients From 10 keV to 100 GeV. Tech. rep. NSRDS-NBS 29. National Bureau of Standards. – 1969. https://doi.org/10.6028/NBS.NSRDS.29

REFERENCES

1. Research Reactors Database (RRDB) // http://nucleus.iaea.org/RRDB.
2. Batyrbekov E., Vityuk V., Vurim V., Vityuk G. Experimental opportunities and main results of the impulse graphite reactor use for research in safety area // Annals of Nuclear Energy. – 2023. – Vol. 182. – P. 109582. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109582
3. Batyrbekov E.G., Vurim A.D., Gaydaychuk V.A., Vityuk V.A. Impul'snyy grafitovyy reaktor: opyt ekspluatatsii i primeneniya dlya ispytaniy tvelov i TVS: Monografiya – OOI “Ishim”. – 2023. – 208 p.
4. Kelsingazina R., Vityuk V., Vurim A., Vityuk V., Mukhamedov N., Tikhomirov G. Computational approaches for determining the nuclear heating value of structural materials during the irradiation at the IGR reactor // Annals of Nuclear Energy. – 2024. – Vol. 204. – P. 110532. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110532
5. Glushkov E.S., Demin V.E., Ponomarev-Stepnoy N.N., Khrulev A.A. Teplovydelenie v yadernom reaktore. – Moscow: Energoatomizdat. – 1985. – 160 p.
6. Bartolomey G.G., Bat' G.A., Baybakov V.D., Alkhutov M.S. Osnovy teorii i metody rascheta yadernykh energeticheskikh reaktorov. Uchebnoe posobie dlya vuzov. — 2-e izd., pererab. i dop. — Moscow: Energoatomizdat, – 1989. – 512 p.
7. Jurbandam Linina. Calculation of the fission q-value and spatial energy deposition in the SAFARI-1 nuclear reactor. University of the Witwatersrand, Johannesburg. – 2018. https://hdl.handle.net/10539/26701
8. Brown Forrest B., Mosteller Russell D., Martin William R. Monte Carlo – Advances and Challenges. Switzerland: Paul Scherrer Institut (PSI). – 2008.
9. Stogov Yu.V. Osnovy neytronnoy fiziki: Uchebnoe posobie. – Moscow: MIFI. – 2008. – 204 p.
10. Klimov A.N. Yadernaya fizika i yadernye reaktory: uchebnik dlya vuzov. – 2-e izd., pererab. i dop. – Moscow: Energoatomizdat. – 1985. – 350 p.
11. Mukhamedov N.E., Vityuk G.A., Kelsingazina R.E., Dolzhikov S.A., Bogomolova I.N. Raschetnoe obosnovanie eksperimentov po issledovaniyu radiatsionnogo razogreva materialov v reaktore IGR. // Fiziko-tekhnicheskie problemy v nauke, promyshlennosti i meditsine: sbornik tezisov dokladov XI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Tomskiy politekhnicheskiy universitet. – Tomsk: Tomskiy politekhnicheskiy universitet. – 2022. – P. 53
12. Mukhamedov N.E., Vityuk G.A., Kelsingazina R.E., Dolzhikov S.A., Bogomolova I.N. Opredelenie rezhimov reaktornykh issledovaniy radiatsionnogo razogreva materialov yadernoy i termoyadernoy tekhniki. // Vestnik VKTU. – 2022. –No. 4 – P. 167–179. https://doi.org/10.51885/1561-4212_2022_4_167
13. Komp'yuternaya model' reaktora IGR dlya statsionarnykh neytronno-fizicheskikh raschetov: a. s. No. 2738 ot 27.12.16 Respublika Kazakhstan / A.D. Vurim, V.M. Kotov, R.A. Irkimbekov, L.K. Zhagiparova, A.A. Baygozhina.
14. Pelowitz D., Fallgren A., McMath G. MCNP6 User's Manual Code Version 6.1.1 Beta. Report LA-CP-14-00745. – 2014.
15. X-5 Monte Carlo Team. MCNP – a General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume I: Overview and Theory: LA-UR-03-1987. Los Alamos National Laboratory. – 2003.
16. Wang M. et. al. The AME2016 atomic mass evaluation (II). Tables, graphs and references // Chinese Phys. C. – 2017. – Vol. 41. – No. 3.
17. Hubbell J. H. Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients, and Energy Absorption Coefficients From 10 keV to 100 GeV. Tech. rep. NSRDS-NBS 29. National Bureau of Standards. – 1969. https://doi.org/10.6028/NBS.NSRDS.29

ИМПУЛЬСТІК ГРАФИТТІ РЕАКТОРДАҒЫ МАТЕРИАЛДАРДЫҢ РАДИАЦИЯЛЫҚ ҚЫЗДЫРУ СИПАТТЫН АНЫҚТАУШЫ НЕЙТРОНДЫ-ФИЗИКАЛЫҚ ПРОЦЕСТЕРДІ ЗЕРТТЕУ

R. E. Kelsingazina[1,2*], V. A. Vityuk[1], G. A. Vityuk[1], N. E. Mukhamedov[1], S.A. Dolzhikov[1]

[1] Қазақстан Республикасының Ұлттық Ядролық орталығы, Курчатов, Қазақстан
[2] Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті, Семей, Қазақстан

** Байланыс үшін E-mail: kelsingazina@nnc.kz*

Реакторішілік эксперименттерді әдістемелі қамтамасыз етуге қойылатын талаптарды қатайту сәулеленетін эксперименттік құрылғылардың қауіпсіздік тұрғысынан маңызды параметрлерін болжау сапасын арттыру қажеттігін айқындайды. Осы жұмыста ИГР реакторында сәулелену кезінде құрылғы элементтерінің температурасын сапалы болжау үшін реактордың нейтрондық және гамма-өрістерінің әсерімен радиациялық қыздыру тетіктерінің талдауы ұсынылған. ИГР реакторында жоспарланған сәулелену кезінде конструкциялық материалдардың үлгілерін нәтижелі радиациялық қыздыруға әртүрлі нейтронды-физикалық процестердің салымын айқындау бойынша есептеулер жүргізілді, конструкциялық материалдардың үлгілерінде көлемдік энергияның бөлінуі айқындалды.

Түйін сөздер: *радиациялық қызу, конструкциялық материалдар, нейтронды-физикалық есептеулер, компьютерлік моделдеу, энергия бөлу.*

STUDY OF NEUTRONIC PROCESSES DETERMINING THE NATURE OF NUCLEAR HEATING OF MATERIALS IN THE IMPULSE GRAPHITE REACTOR

Р. Е. Келсингазина[1,2*], В. А. Витюк[1], Г. А. Витюк[1], Н. Е. Мухамедов[1], С. А. Должиков[1]

[1] National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan
[2] Shakarim University of Semey, Semey, Kazakhstan

** E-mail for contacts: kelsingazina@nnc.kz*

Tightening the requirements for methodological support for in-pile experiments determines the need to improve the quality of predicting parameters of irradiated experimental devices that are important from a safety point of view. To qualitatively predict the temperature of device elements during irradiation in the IGR reactor, this paper presents an analysis of the radiation heating mechanisms under the influence of neutron and gamma fields of the reactor. Calculations were conducted to determine the contribution of various neutronic processes to the resulting nuclear heating of samples of structural materials during their planned irradiation in the IGR reactor, and the volumetric distribution of energy release in samples of structural materials was determined.

Keywords: *nuclear heating, structural materials, neutronics calculations, computer modeling, energy release.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-65-73
УДК 550.34.098: 551.324.63

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МИРОВЫХ И ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЛЕДНИКАХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

Н. Н. Михайлова*, А. С. Мукамбаев, Е. Н. Казаков, В. Г. Морозов, У. А. Игибаев

Филиал «Институт геофизических исследований» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

** E-mail для контактов: mikhailova@kndc.kz*

Глобальное изменение климата влияет практически на все сферы человеческой деятельности и мировой экосистемы в целом. Рост температуры, в частности, приводит к ускорению таяния ледников, что в свою очередь приводит к изменению расхода рек, имеющих ледниковое питание. Это явление неизбежно оказывает влияние на жизнедеятельность населенных пунктов, использующих воду этих рек.

Сейсмические и инфразвуковые станции мониторинговой сети НЯЦ на протяжении многих лет регистрируют колебания земли и воздуха. Накопленная база данных инструментальных наблюдений содержит информацию об изменениях климата в предыдущие десятилетия, такую, например, как частота и пространственное распределение ледниковых землетрясений.

В этой связи предлагается провести анализ изменений режима деструкции ледников, основанный на изучении сейсмических и инфразвуковых данных, полученных за последние два десятилетия казахстанской мониторинговой сетью и изучить связь найденных закономерностей с глобальными изменениями климата.

В настоящей статье описываются современные представления о влиянии климата на горные ледники, общие сведения об изменении размеров и состояния ледников Казахстана. Рассматривается возможность применения криосейсмологии как нового инструмента изучения динамики изменения ледников. В заключении статьи приводятся результаты изучения динамики ледников сейсмическими методами в зоне Тянь-Шаня по литературным данным.

Ключевые слова: *сейсмология, климат, ледники, криосейсмология, ледниковые землетрясения, суточные вариации.*

Введение

В последние годы в связи с большим интересом к проблемам глобального потепления началось активное изучение ледников как в арктической зоне, так и в горных районах на континентах. Сейчас уже неопровержимо доказано, что средняя глобальная температура воздуха постоянно растет. На рисунке 1 [1] показано, как на протяжении почти 150 лет возрастает температура воздуха. В августе 2023 г. по сравнению с августом 1880 г. этот прирост составил 2,53 °С.

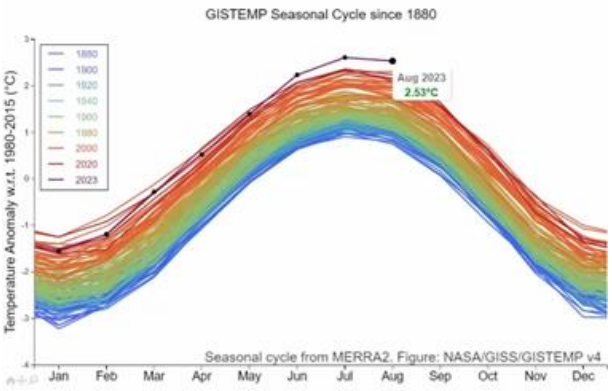


Рисунок 1. Изменение средней глобальной температуры воздуха (январь-декабрь) с 1880 по 2022 гг. [1]

В связи с изменениями температуры происходят различные явления в уровне океанов, в изменении баланса массы ледников. Различными исследованиями в разных регионах мира установлено, что баланс массы ледников был наиболее негативным в южных Андах, европейских Андах, Пиренеях, на Кавказе и наименее негативным в высокогорной Азии при значительных различиях внутри регионов. [2, 3]. На рисунках 2 и 3 представлена картина роста концентрации CO_2 по данным инструментальных наблюдений на обсерватории Mauna Loa помесячно за 2019–2023 гг. и за 60 лет. Четко видно, что происходит постоянный рост CO_2 с вариациями содержания в течение года.

По данным ледниковых кернов есть уникальная картинка изменения температуры и содержания CO_2 за последние 800 тысяч лет. На рисунке 4 из [4] представлены колебания температуры воздуха и углекислого газа в атмосфере. Видно, что два этих параметра меняются согласованно. Последняя точка (звездочка) показывает содержание CO_2 в атмосфере в настоящее время (2023 г.). Снизить эмиссию парниковых газов человечеству пока не удается.

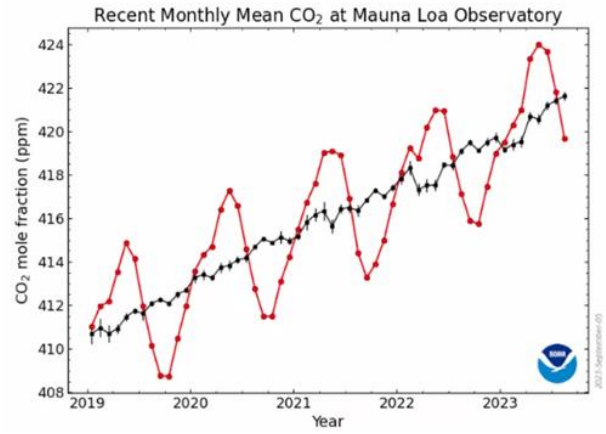


Рисунок 2. Рост концентрации CO_2 по данным инструментальных наблюдений на обсерватории Мауна Лоа в последние годы

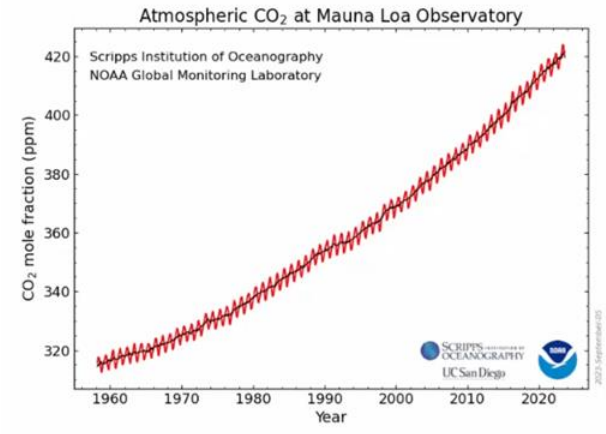


Рисунок 3. Долговременные изменения концентрации CO_2 по данным инструментальных наблюдений на обсерватории Мауна Лоа

Результаты и обсуждение

1. Современные представления о влиянии климата на горные ледники

Современное сокращение ледников наблюдается во всем мире. Баланс массы ледников зависит не только от температуры, но и от зимних осадков [4]. Были такие периоды, когда размеры ледников вдруг увеличивались. Но сейчас, надо признать, температурное влияние превосходит влияние осадков. Мировой прогноз состоит в том, что температура воздуха в горных районах продолжит повышаться в среднем на 0,3 °С за десятилетие.

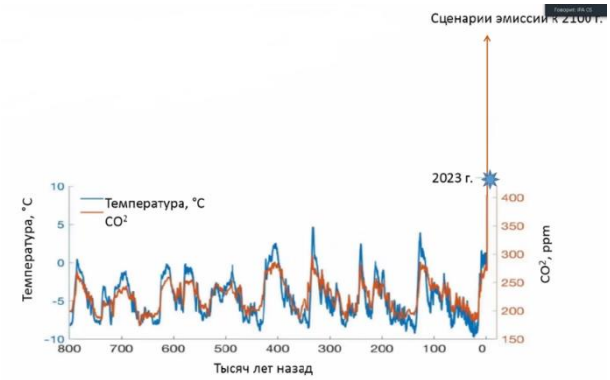


Рисунок 4. Колебания температуры воздуха и углекислого газа в атмосфере по данным ледниковых кернов за последние 800 тыс. лет [4]

Небольшие ледники, например, в Европе и Восточной Африке, тропических Андах к 2100 г. потеряют более 80% своей нынешней массы. Потеря массы ледников и ледниковых покровов зависит от сценария выброса **CO_2**: при неблагоприятном сценарии вклад за счет таяния Гренландии и Антарктиды в прирост уровня океана составит к концу XXI века 56 см.

При разных моделях поведения человечества прогнозируется, что к концу XXI века ледники Российской Арктики потеряют от 25 до 50% массы, а оледенение горных ледников сократится на 50–80% (рисунок 5) [5]. Есть «агрессивные сценарии» (красные линии) и более лояльные (черные).

Влияние изменения климата на криосферу происходит в различных направлениях. Выделяются следующие следствия воздействия: уменьшение площади, объема и мощности залегания, меньший водозапас в межсезонье. По мере сокращения ледника вода речного стока будет сначала увеличиваться, а затем уменьшаться, то есть изменение происходит нелинейно. По расчетам исследователей вклад в общий сток рек высокогорной Азии составляет: снег – около 2/3, ледники – 4–12%.

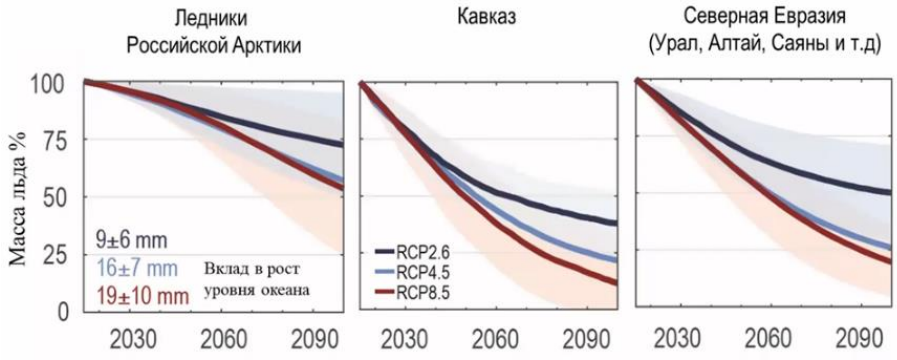


Рисунок 5. Прогноз эволюции ледников в России [5]

В России создан и постоянно обновляется каталог ледников России по спутниковым данным https://www.glacru.ru. Анализ сведений по изучению ледников показывает, что в настоящее время основные методы изучения ледников – это мониторинг по космоснимкам, инструментальные методы измерения толщины льда георадаром, бурение и изучение ледовых кернов, палеоэкологические реконструкции и различные геофизические методы.

Таким образом:

− продолжающееся потепление климата приводит к усиленному таянию ледников по всему Земному шару;

− исчезновение горных ледников во многих районах мира из-за потепления практически неизбежно, это лишь вопрос времени;

− вместе со льдом погибнет и содержащаяся в нем палеоклиматическая информация, что очень досадно для последующих поколений исследователей.

2. Общие сведения об изменении ледников Казахстана

Основные сведение по этому вопросу были взяты из работы «Водные ресурсы Казахстана. Оценка, прогноз, управление», том VI «Снежно-ледовые ресурсы Казахстана» [6]. Суммарная площадь ледников Азии оценивается в 120 560 км² [7]. Из них 3 500 км² расположено в Северной Азии и Сибири и 116–180 км² – в высоких горах Азии. Наибольшие площади оледенения сосредоточены в Гималаях (33 050 км²), горах Тянь-Шаня (15 417 км²), Каракорума (16 600 км²), Памира (12 260 км²) и Кунь-Луня (12 260 км²).

Но лишь для 18 ледников продолжительность изучения временного ряда ежегодного баланса массы превышает 20 лет. На 12 из них наблюдения по разным причинам были прекращены в начале 1980–1990 гг. В настоящее время в высоких горах Азии наблюдения проводятся только на 5 ледниках – три из них расположены на Алтае, два – на Тянь-Шане.

Результаты мониторинга ледников не оставляют сомнений в том, что во второй половине XX – начале XXI века оледенение Земли находилось в состоянии деградации. В 1990 г. Межправительственная группа экспертов по изменению климата признала этот факт, как один из главных аргументов глобального потепления климата. В работе Е. Н. Вилесова «Изменение размеров и состояния ледников Казахстана за 60 лет (1955–2015 гг.)» [8] отмечается, что долговременный запас воды в ледниках обеспечивает до 30–40% летнего стока горных рек. Учитывая реальную возможность быстрого сокращения размеров современного оледенения, в настоящее время особенно важно проследить временные и пространственные колебания параметров ледников и изучить влияние этих колебаний на изменение водных ресурсов в районах с развитым оледенением.

На рисунке 6 показана карта горно-ледниковых районов Казахстана – от Алтая на северо-востоке до Таласского Алатау на юго-западе, насчитывающих сотни и тысячи ледников.

По материалам Каталога ледников СССР, составленного по данным 1955–1956 гг., а также по результатам более поздних определений размеров оледенения во всех горно-ледниковых районах юго-восточного Казахстана оцениваются величины и темпы сокращения числа ледников, их площадей и объёмов, а также баланса их массы за 60 лет (рисунок 7).

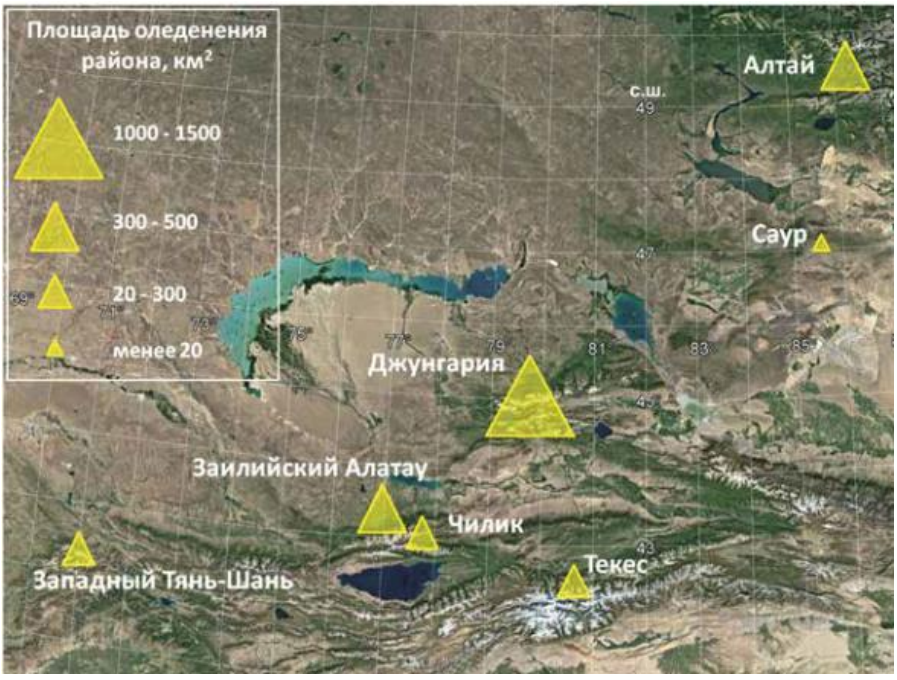


Рисунок 6. Горно-ледниковые районы юго-восточного Казахстана [8]

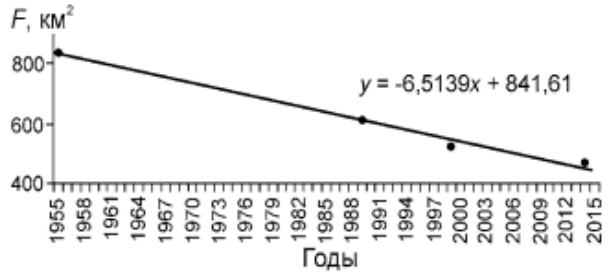


Рисунок 7. Сокращение площади ледников Казахстанской Джунгарии за 1956–2015 гг. [10]

В разные годы начала текущего столетия для изучения состояния оледенения всех ледниковых систем Казахстана стали использоваться космические снимки со спутника Landsat с разрешением 15 м. Границы ледников на космоснимках были дешифрированы и оцифрованы (векторизованы) с помощью ГИС программ ArcGIS и MapInfo [9, 10]. Полученные результаты использованы для количественной оценки происходивших изменений морфометрических параметров ледников (площади, длины, уклона и т. п.).

Джунгарский (Жетысу) Алатау – самый «оледенелый» хребет Казахстана. Самые большие относительные потери площади (48,2%) произошли у ледников, расположенных на южном макросклоне южного Центрального хребта и хр. Беджинтау. Изменение (сокращение) ледниковой площади в границах Казахстанской Джунгарии за 59-летний период (1956–2015 гг.) иллюстрирует рисунок 7. Площадь оледенения за этот период сократилась на 374 км^2 – с 841до 467 км^2 (по 6,34 км^2 /год), или на 44,5% (по 0,75 %/год) Число ледников за это время уменьшилось на 462, т е на 32,7%. Объём льда снизился на 15,4560 км^3 – с 33,3061 до 17,8501 км^3, т е на 46,4% (по 0,79 %/год) Максимальные абсолютные потери объёма льда (почти 5,4 км) отмечены у ледников Северной Джунгарии.

За 60 лет число ледников в Казахстане уменьшилось на 739, или на 26,5%. Площадь ледников сократилась во всех ледниковых районах с 1744,8 до 1032,1 км², т.е. на 712,7 км², что составляет 11,9 км² в год. Относительные изменения площади составили 40,8%, по 0,68% в год.

Полученные за 60 лет данные по деградации оледенения гор Казахстана представляют собой базовую основу для мониторинга последующих изменений, происходящих с ледниками в разных горно-ледниковых районах Казахстана.

3. Криосейсмология как новый инструмент изучения динамики ледников

В последние десятилетия начало динамично развиваться новое направление в изучении ледниковых землетрясений, называемое криосейсмологией. Особенно в последнее десятилетие наблюдается взрывной рост ежегодного числа публикаций по пассивной ледниковой сейсмологии. Сейсмические сигналы от широкого спектра процессов, связанных с ледниками, заполняют довольно большой диапазон частот (от 10^{-3} до 10^2 Гц) и значительный интервал по моментной магнитуде (от Mw = −3 до Mw = 7), что позволяет по-новому взглянуть на фундаментальные процессы в криосфере. В работе [11] обсуждаются сейсмические источники в криосфере, а также исследовательские задачи на ближайшее будущее.

Еще в конце XIX века полярным исследователям (Nansen,1897) [12] было описано явление: «... шум, похожий на выстрелы орудий... и земля содрогается». Тем не менее, до недавнего времени массивные ледяные тела, такие как в Гренландии и Антарктике, вызывали относительно небольшой интерес у сейсмологов из-за низкого уровня тектонической сейсмической активности в полярных регионах. Например, несмотря на то, что в Антарктике толчки, связанные со льдом [13, 14], были зарегистрированы за десятки лет до первых тектонических событий, зарегистрированных в регионе [15, 16], криосферная сейсмичность не была активной областью исследований в конце XX века. Ситуация резко изменилась со времени первого сообщения о так называемых «ледниковых землетрясениях» [17, 18]. Открытие этих глобально детектируемых сейсмических событиях, связанных со сбросом льда в океан, послужило толчком к многочисленным теоретическим, экспериментальным и наблюдательным исследованиям криогенных сейсмических явлений и ледовых землетрясений (под «ледовыми землетрясениями» мы понимаем косейсмические события хрупкого разрушения во льдах). После этих статей число соответствующих научных исследований резко возросло (рисунок 8), что привело к установке новых сейсмических сетей, финансируемых на международном уровне, и многочисленным сессиям, посвященным ледниковой сейсмологии, на различных конференциях, (например, AGU 2010 г., EGU GA 2011 г., JGU в 2015 и 2016 гг., IUGG 2013 и 2015 гг. и ESC GA 2016 г.).



Рисунок 8. Общее количество статей по пассивной ледниковой сейсмичности, 1950–2016 гг. (из работы [11])

С момента проведения первых исследований было опубликовано более 150 статей на эту тему, причем большинство статей появилось после основополагающей работы Ekström et al. [16] о ледниковых зе-

млетрясениях. Их первоначальная интерпретация в выражении внезапных подвижек ледников в качестве механизма источника требовала смещения объемов льда порядка 10 км^3 на 10 м в течение минуты или меньше. Несмотря на то, что эта цифра казалась нереально большой, большинство измерений смещения поверхности ледников и ледяных потоков в тот момент не имели достаточного временного разрешения, чтобы опровергнуть эту гипотезу. ***Таким образом, открытие ледниковых землетрясений привело к развитию широкого спектра новых геофизических исследований***. Это пример того, как внедрение новых аналитических инструментов может вдохновить на новое видение тектоники и динамики ледников.

Обзор в работе [11] начинается с ознакомления с основными типами сейсмических источников в криосфере и их особенностями, после чего следует обсуждение процессов и свойств ледникового льда, определяемых с помощью сейсмических сигналов. Основное внимание уделяется сейсмическим сигналам, исходящим от ледников и ледяных щитов.

Работа, посвященная криосейсмологии, как обзор в этой области, представлена в докладе Виноградова Ю. А. (Геофизическая служба РАН, Пермь, 2019 г.). Криосейсмология – междисциплинарная наука, объединяющая два направления наук о Земле – сейсмологию и гляциологию. Криосейсмология исследует сейсмические и инфразвуковые волны, генерируемые на границах лед-океан, лед-земная поверхность. Они возникают при разрушении ледниковых покровов, деструктивных процессах в криолитосфере в зоне вечной мерзлоты. После статей [17–19] большинство работ было сфокусировано на изучении различных проявлений сейсмичности именно в арктической зоне. В частности, работы российских и норвежских ученых сосредоточены на изучении явлений, связанных со льдом, на архипелаге Шпицберген, где находятся более 100 пульсирующих ледников (рисунок 9) [20–23]. Результаты исследований заключаются в том, что были обнаружены изменения количества сейсмических событий, сезонный характер сейсмичности для событий с l> Ml≥2,2, согласующийся с изменениями температуры (рисунок 10).



Рисунок 9. Архипелаг Шпицберген [20]

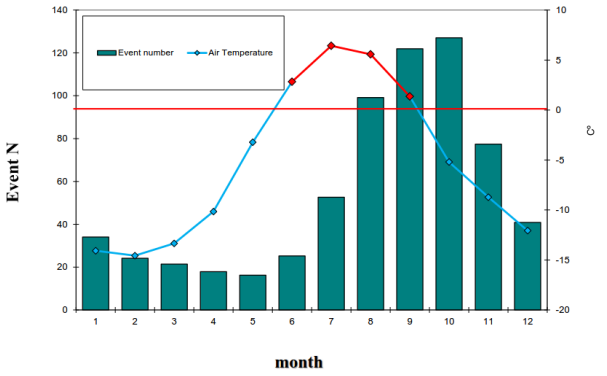


Рисунок 10. Сезонный характер сейсмичности ледовых землетрясений с 1≤ML≤2,2 [20]

Также сезонный характер ледниковой сейсмичности отмечен и в количестве инфразвуковых событий (рисунок 11).

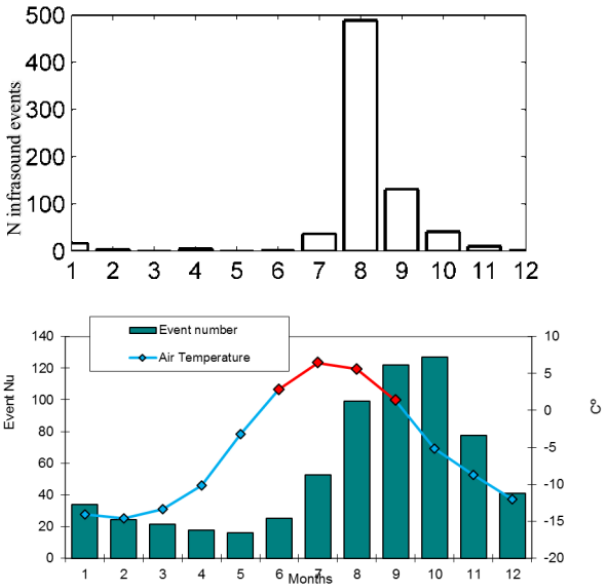


Рисунок 11. Среднемесячное количество инфразвуковых событий в 2011–2015 гг. [20]

Результаты многочисленных исследований [20–30] показывают, что суточная температура воздуха модулирует ледниковую сейсмику. Открытая поверхность ледника испытывает тепловое сжатие, когда ледник остывает, тогда как участки, изолированные толстым мусором, не испытывают такой термической нагрузки. Таким образом, для незащищенного льда каждую ночь поверхность растрескивается, что постепенно повреждает и выветривает лед. Подобные процессы наблюдаются впервые при относительно теплых температурах и за пределами поверхности земли. Расселины и трещины являются принципиально важными компонентами баланса массы ледников [31–33]. Например, они служат путями талой воды в ледниковую водопроводящую систему и, следовательно, приносят огромное количество скрытого тепла в ледник. Однако, ранее ни одно из предыдущих

исследований не фокусировалось на механике разрушения покрытых обломками или гималайских ледников, что позволяет предположить, что о них известно очень мало.

4. Изучение динамики ледников сейсмическими методами в зоне Тянь-Шаня по литературным данным

В горных районах Тянь-Шаня почти нет работ по криосейсмологии, хотя хорошо известно, что здесь находятся масштабные ледники. Особенно интересным представляется изучение ледника Энгильчек в области высокого Тянь-Шаня.

Исследования этого ледника описаны в ряде работ, проводимых сотрудниками Центрально-Азиатского института прикладных исследований Земли (ЦАИИЗ) совместно с Немецким Центром Исследований Земли (GFZ), Потсдам.

В 2019 г. появилась статья авторов Усупаев Ш.Э., Асминг В.Э. и др. «О землетрясениях гляциотектонического характера горных стран на примере ледника Энгильчек в бассейне реки Сары-Джаз Киргизского Тянь-Шаня» [34]. В статье рассматривается район ледника Энгильчек, расположенного у хребта Хан-Тенгри в бассейне р. Сары-Джаз Кыргызского Тянь-Шаня. Здесь была установлена сейсмическая станция ЦАИИЗ «Мерцбахер», выявлен ряд сейсмических событий, ассоциируемых с активностью ледников. Записи событий различаются по спектральному составу, что позволяет предположить разную природу этих событий. Было выявлено большое количество слабых и средней магнитуды сейсмических событий.

Сотрудники ЦАИИЗ производили комплекс работ по сейсмическому, гляциальному мониторингу и зондированию ледника Энгильчек. Аэрорадиолокационные измерения позволили определить, что мощность ледника Энгильчек в районе оз. Мерцбахера составляет 375 м. В районе ледника были установлены три сейсмические станции. Схема наблюдений показана на рисунке 12.



Рисунок 12. Схема сейсмических наблюдений ЦАИИЗ [34]

Но после анализа данных записи слабых землетрясений были обнаружены только на одной станции – Мерцбахер. Весь анализ проведен по одной станции. За весь период наблюдений представительными для анализа оказались данные только за два месяца – март и апрель 2018 года. По этим данным были обнаружены всего 179 сейсмических событий, ассоциированных с активностью ледников. Магнитуда этих событий составляла от 0,9 до 2,5.

Большую активность проявлял Северный Энгильчек. Однако точность определений была невысока, поэтому нельзя утверждать, что это именно так. Был сделан спектральный анализ наиболее сильных событий из зарегистрированный серии событий. Он показал, что все события можно разделить на две группы. Первый тип событий — это низкочастотные события, пик спектральной мощности лежит в полосе от 1.5 до 2,5 Гц. Второй тип – максимум спектральной мощности в полосе от 3 до 5 Гц. По-видимому, природа этих двух типов событий различна (см. рисунок 13).

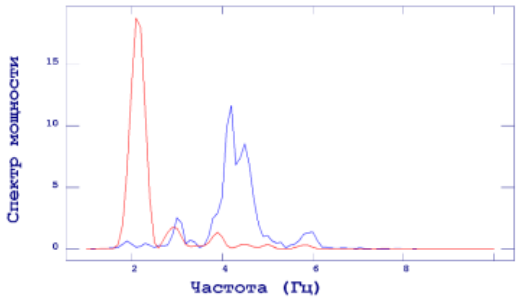
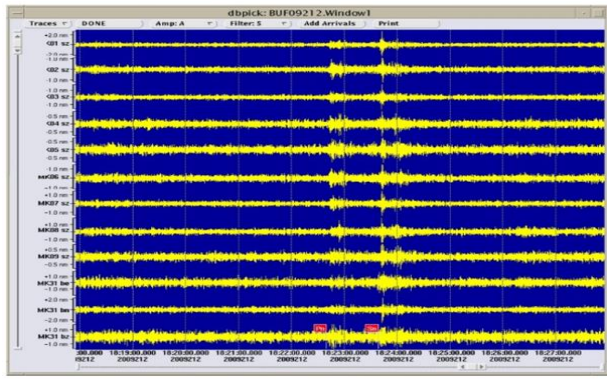


Рисунок 13. Два типа спектров сейсмических событий (относительные единицы) [34]

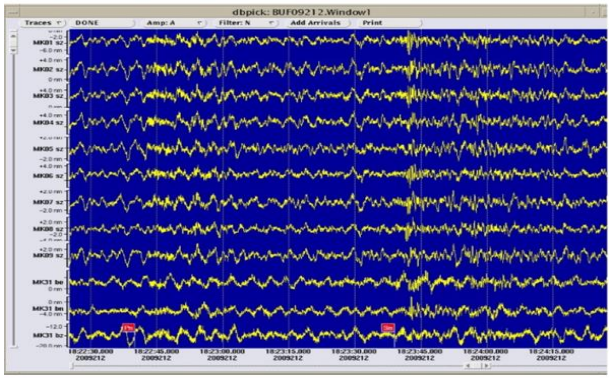
Авторы отметили, что даже данные одиночной сейсмостанции с успехом могут быть применены для изучения динамики близких к ним ледников при условии проведения аккуратной калибровки скоростной модели и определения систематических погрешностей поляризационных азимутов. Лучшим вариантом, несомненно, будет установка нескольких станций вокруг изучаемого ледника [34].

Как показал проведенный анализ литературных источников, статья авторов из НЯЦ РК Михайловой Н. Н. и Комарова И. И. [35] остается первой в изучении ледовых землетрясений горных ледников. Мы не встретили в научной печати аналогичного подхода в использовании сейсмической группы для дистанционной регистрации слабых событий, ассоциированных с ледовыми событиями (рисунок 14). Статья была опубликована в 2009 году [35] и посвящена изучению природы сейсмических событий, происходящих в так называемом «высотном» Тянь-Шане, к которому относится часть горного Центрального Тянь-Шаня, включающего значительное число вершин высотой более 6000 м. Большая часть этой территории находится в Синьцзян-Уйгурском автономном районе Китая, меньшая часть (в 4–5 раз меньше) – в пределах Казахстана и Кыргызстана. В Китае, вблизи границы с Кыргызстаном находится самый северный семитысячник в мире высотой 7439 м – пик Победы (называемый в Китае – Томур). Географически вся

высотная часть Тянь-Шаня расположена восточнее меридиана 79°в.д. и имеет протяженность с запада на восток (между параллелями 41° и 43°с.ш.) несколько сот километров.



а)



б)

Рисунок 14. Вид записей исследуемых событий станцией PS23-Маканчи: а – обзорная; б – отдельная запись события всеми элементами группы [35]

Заключение

Изучены мировые и отечественные источники по изменению ледников под влиянием глобального потепления. Подчеркивается, что в последнем периоде исследований (с начала XXI века) особое внимание уделяется геофизическим методам изучения процессов в ледниках, в частности, развитию нового направления – криосейсмологии. Для горных ледников пока очень мало экспериментальных работ по сейсмологическим исследованиям. Нигде в мире не описан дистанционный метод контроля процессов деструкции ледников, который развивается в нашем исследовании.

Таким образом, проведенные нами в 2003–2008 гг. исследования впервые позволили подойти к объяснению природы сейсмических сигналов, регистрируемых в большом количестве станциями Казахстана. Представляется, что ледники Тянь-Шаня выступают постоянными генераторами слабых землетрясений. Дальнейшие наблюдения за событиями позволят более детально изучить закономерности проявления и динамику развития процессов в ледниках Центрального Тянь-Шаня.

Новым этапом в изучении этих процессов станут исследования по влиянию глобальных изменений климата на ледники Тянь-Шаня с использованием уникальных возможностей сейсмических групп НЯЦ РК, входящих в международные сети мониторинга ядерных взрывов и землетрясений, в комплексе с установленными вблизи ледника полевыми сейсмическими и инфразвуковыми станциями.

Благодарности

Работа проведена при финансировании Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН BR21881915).

Литература / References

1. С. Кутузов, О. Соломина. Современные изменения горных ледников и климат. Материалы международного форума «Устойчивое развитие горных территорий». Санкт-Петербург, 12–13 октября 2023 г. [S. Kutuzov, O. Solomina. Sovremennye izmeneniya gornykh lednikov i klimat. Materialy mezhdunarodnogo foruma «Ustoychivoe razvitie gornykh territoriy». Sankt-Peterburg, 12–13 oktyabrya 2023 g.] (In Russ.)
2. M. Zemp, M. Huss, E. Thibert et al. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016 // Nature. – 2019. Vol. 568/ – P. 382–386
3. S. Dankendorf, M. Marcos, Guy Woppelmann, Riccardo Riva. Reassessment of 20th century global mean sea level rise // Environmental sciences. – May 22, 2017. Vol. 114 (23). – P. 5946–5951.
4. Бушуева И.С., Соломина О.Н. Колебания ледника Кашкаташ в XVII–XXI в.в. по картографическим, дендрохронологическим и лихенометрическим данным //Лед и снег. – 2012. – № 2(118). – С. 121–130. [Bushueva I.S., Solomina O.N. Kolebaniya lednika Kashkatash v XVII–XXI v.v. po kartograficheskim, dendrokhronologicheskim i likhenometricheskim dannym //Led i sneg. – 2012. – No. 2(118). – P. 121–130.] (In Russ.)
5. Специальный доклад МГЭИК «Океан и криосфера», 2019 Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate – (ipcc.ch)
6. И.В. Северский, А.Л. Кокарев, Н.В. Пиманкина. Снежно-ледовые ресурсы Казахстана. – Алматы. – 2012. – 244 с. [I.V. Severskiy, A.L. Kokarev, N.V. Pimankina. Snezhno-ledovye resursy Kazakhstana. – Almaty. – 2012. – 244 p.]
7. M. Dyurgerov, M. Meier Glaciers and Changing Earth System : A 2004 Snapshot. Occasional Paper 58, Institute of Arctic and Alpine Research, – 2005.
8. Е.Н. Вилесов. Изменение размеров и состояния ледников Казахстана за 60 лет (1955–2015 гг.). Лед и снег. – 2018. – Т. 58. – № 2. – С. 159–170. [E.N. Vilesov. Izmenenie razmerov i sostoyaniya lednikov Kazakhstana za 60 let (1955–2015 gg.). Led i sneg. – 2018. – Vol. 58. – No. 2. – P. 159–170.] (In Russ.)
9. Е.Н. Вилесов. Динамика и современное состояние оледенения гор Казахстана. – Алматы: КазНУ, – 2016. – 268 с. [E.N. Vilesov. Dinamika i sovremennoe sostoyanie oledeneniya gor Kazakhstana. – Almaty: KazNU, – 2016. – 268 p.] (In Russ.)
10. Е.Н. Вилесов, В.И. Морозова, И.В. Северский. Оледенение Джунгарского (Жетысу) Алатау: прошлое, на-

стоящее, будущее. – Алматы: КазНУ. – 2013. – 244 с. [E.N. Vilesov, V.I. Morozova, I.V. Severskiy. Oledenenie Dzhungarskogo (Zhetysu) Alatau: proshloe, nastoyashchee, budushchee. – Almaty: KazNU. – 2013. – 244 p.] (In Russ.)
11. E. Podolsky, F. Walter. Cryoseismology // Reviews of Geophysics. – 2016. – P. 708–758. https://doi.org/10.1002/2016RG000526
12. F. Nansen, Fhartest North. – New York: Harper and Brothers Publ. – 1897. – Vol. 2.
13. Adams R.D., Antarctic earthquakes // Nature. – 1988. – Vol. 331. – P. 665.
14. Adams R.D., A.A. Hughes, B.M. Zhang. (1985) A confirming earthquake in continental Antarctica // Geophys. J.R.Astron. Soc. – 1985. – Vol. 81. – P. 489–492.
15. Adams R.D. Small earthquakes in Victoria Land, Antarctica // Nature. – 1069. – Vol. 224. – P. 255–256.
16. Ekström G., M. Nettles and G.A. Abers, Glacial earthquakes // Science. – 2003. – Vol. 302 (5645). – P. 622–624, https://doi.org/10.1126/science.1088057
17. Ekström G., M. Nettles and V.C. Tsai, Seasonality and increasing frequency of Greenland glacial earthquakes // Science. – 2006. – Vol. 311(5768). – P. 1756–1758. https://doi.org/10.1126/science.1122112
18. Larose E., et al. (2015) Environmental seismology: What can we learn on earth surface process with ambient noise? // J.Appl.Geophys. – 2015. – Vol. 116. – P. 62–74. https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.02.001
19. Tsai V.C. and G.Ekström (2007). Analysis of glacial earthquakes // J. Geophys. Res. – 2007. – Vol. 112. – P. F03S22. https://doi.org/10.1029/2006JF000596
20. А.В. Федоров, В.Э. Асминг, С.В. Баранов, А.Н. Виноградов, З.А. Евтюгина, В.А. Горюнов. Сейсмологические наблюдения за активностью ледников архипелага Шпицберген // Вестник МГТУ. – 2016. – Т. 19. – № 1/1. – С. 151–159. [A.V. Fedorov, V.E. Asming, S.V. Baranov, A.N. Vinogradov, Z.A. Evtyugina, V.A. Goryunov. Seysmologicheskie nablyudeniya za aktivnost'yu lednikov arkhipelaga Shpitsbergen // Vestnik MGTU. – 2016. – Vol. 19. – No. 1/1. – P. 151–159.] (In Russ.)
21. А.В. Федоров, В.Э. Асминг. Низкочастотные землетрясения архипелага Шпицберген // Комплексные исследования природы Шпицбергена // Материалы международной научной конференции. Мурманск, 1–3 ноября, 2012 г. – Вып. 11. – С. 249–253. [A.V. Fedorov, V.E. Asming. Nizkochastotnye zemletryaseniya arkhipelaga Shpitsbergen // Kompleksnye issledovaniya prirody Shpitsbergena // Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. Murmansk, 1–3 noyabrya, 2012 g. – Issue 11. – P. 249–253] (In Russ.)
22. A. Köhler, Ch. Nuth, J. Kohler, E. Berthier, C. Weidle, J. Schweitzer. A 15-year record of frontal glacier ablation rates estimated from seismic data // Geophysical Research Letters. – Vol. 43(23). – P. 12155–12164, https://doi.org/10.1002/2016GL070589
23. A .Köhler, Ch. Nuth, J. Schweitzer, C. Weidle, S. Gibbons. Regional passive seismic monitoring reveals dynamic glacier activity on Spitsbergen, Svalbard // Polar Research. – 2015. – Vol. 34. – P. 26178. https://doi.org/10.3402/polar.v34.26178
24. A. Köhler, M. Pętlicki, Pierre-Marie Lefeuvre, G. Buscaino, Ch. Nuth, Ch. Weidle. Contribution of calving to frontal ablation quantified from seismic and hydroacustic observations calibrated with lidar volume measurements // The Cryosphere. – Vol. 13. – P. 3117–3137. https://doi.org/10.5194/tc-13-3117-2019
25. A. Köhler, V. Maupin, Ch. Nuth, Ward Van Pelt. Characterization of seasonal glacial seismicity from a single-station on-ice record at Holtedahlfonna, Svalbard // Annals of Glaciology. – 2019. – Vol. 60 (79). – P. 23–36. https://doi.org/10.1017/aog.2019.15
26. D. Tetzner Ivovich. Crio-sismología: Qué pasa con los glaciares cuando tiembla? 2021. https://glaciarschilenos.org
27. Kanao, M. (2018a). A Decade of Advances in Cryoseismology. In Polar Seismology – Advances and Impact. IntechOpen.
28. Kanao, M. (2018b). A New Trend in Cryoseismology: A Proxy for Detecting the Polar Surface Environment. Polar Seismology – Advances and Impact, 75.
29. O. Lamb, J. Lees, L. Marin, J. Lazo, A. Rivera, M. Shore, S. Lee. Investigating potential icequakes at Llaima volcano, Chile // Volcanica. – 2020. – Chile. – P. 29–42.
30. E. Podolskiy, K. Fujita, S. Sunako, A. Tsushima, R. Kayastha. Nocturnal Thermal Fracturing of a Himalayan Debris-Covered Glacier Revealed by Ambient Seismic Noise // Geophysical Research Letters. – 2018. – Vol. 10.1029. – P. 9699–9709.
31. Colgan, W., Rajaram, H., Abdalati, W., McCutchan, C., Mottram, R., Moussavi, M. S., & Grigsby, S. Glacier crevasses: Observations, models, and mass balance implications // Reviews of Geophysics. – 2016. – Vol. 54(1). – P. 119–161. https://doi.org/10.1002/2015RG000504
32. Cook, J. M., Hodson, A. J., & Irvine-Fynn, T. D. L. Supraglacial weathering crust dynamics inferred from cryoconite hole hydrology // Hydrological Processes. – 2016. – Vol. 30(3). – P. 433–446. https://doi.org/10.1002/hyp.10602
33. Sakai, A., & Fujita, K. Contrasting glacier responses to recent climate change in high-mountain Asia. // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7(1). – P. 13717. https://doi.org/10.1038/s41598-017-14256-5
34. Усупаев Ш.Э., Асминг В.Э., Шаршебаев А.К., Алтынбек уулу Т., Рахматилла уулу З., Анаркулов Б.А. О землетрясениях гляциотектонического характера горных стран на примере ледника Энгилчек в бассейне реки Сары-Джаз Кыргызского Тянь-Шаня // Известия ВУЗов Кыргызстана. – 2019. – № 12. – С. 40–49. [Usupaev Sh.E., Asming V.E., Sharshebaev A.K., Altynbek uulu T., Rakhmatilla uulu Z., Anarkulov B.A. O zemletryaseniyakh glyatsiotektonicheskogo kharaktera gornykh stran na primere lednika Engilchek v basseyne reki Sary-Dzhaz Kyrgyzskogo Tyan'-Shanya // Izvestiya VUZov Kyrgyzstana. – 2019. – No. 12. – P. 40–49.] (In Russ.)
35. Михайлова Н.Н., Комаров И.И. Ледниковые землетрясения Центрального Тянь-Шаня / Н.Н. Михайлова, И.И. Комаров // Вестник НЯЦ РК. – 2009. – Вып. 3. – С. 120–126. [Mikhailova N.N., Komarov I.I. Glacial Earthquakes of the Central Tian-Shan / N.N. Mikhaylova, I.I. Komarov // NNC RK Bulletin. – 2009. – Issue 3. – P. 120–126.] (In Russ.)

КЛИМАТТЫҢ ӨЗГЕРУІНІҢ ӘСЕРІНЕН МҰЗДЫҚТАРДАҒЫ СЕЙСМИКАЛЫҚ ПРОЦЕСТЕРДІ ЗЕРТТЕУ БОЙЫНША ӘЛЕМДІК ЖӘНЕ ОТАНДЫҚ ДЕРЕККӨЗДЕРГЕ АНАЛИТИКАЛЫҚ ШОЛУ

Н. Н. Михайлова*, А. С. Мукамбаев, В. Г. Морозов, Е. Н. Казаков, У. А. Игибаев

ҚР ҰЯО РМК «Геофизикалық зерттеулер институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

** Байланыс үшін E-mail: mikhailova@kndc.kz*

Жаһандық климаттың өзгеруі адам қызметінің барлық салаларына және жалпы әлемдік экожүйеге әсер етеді. Температураның жоғарылауы, атап айтқанда, мұздықтардың еруінің жеделдеуіне әкеледі, бұл өз кезегінде мұздық қоректенетін өзендердің ағынының өзгеруіне әкеледі. Бұл құбылыс сөзсіз осы өзендердің суын пайдаланатын елді мекендердің өміріне әсер етеді.

ҰЯО бақылау желісінің сейсмикалық және инфрадыбыстық станциялары жылдар бойы жер мен ауаның ауытқуын тіркеп келеді. Жинақталған аспаптық бақылау дерекқорында алдыңғы он жылдықтардағы климаттың өзгеруі туралы ақпарат бар, мысалы, мұздық жер сілкіністерінің жиілігі мен кеңістіктік таралуы.

Осыған байланысты, қазақстандық мониторинг желісі соңғы екі онжылдықта алған сейсмикалық және инфрақызыл деректерді зерделеуге негізделген мұздықтардың жойылу режимінің өзгерістеріне талдау жүргізу және табылған заңдылықтардың жаһандық климаттың өзгеруімен байланысын зерделеу ұсынылады.

Осы мақалада климаттың таулы мұздықтарға әсері туралы қазіргі заманғы идеялар, Қазақстан мұздықтарының мөлшері мен жай-күйінің өзгеруі туралы жалпы мәліметтер сипатталған. Крио сейсмологияны мұздықтардың өзгеру динамикасын зерттеудің жаңа құралы ретінде қолдану мүмкіндігі қарастырылуда. Мақаланың қорытындысында әдеби деректер бойынша Тянь-Шань аймағындағы сейсмикалық әдістермен мұздықтардың динамикасын зерттеу нәтижелері келтірілген.

Түйін сөздер: *сейсмология, климат, мұздықтар, крио сейсмология, мұздық жер сілкінісі, күнделікті вариация.*

ANALYTICAL REVIEW OF GLOBAL AND DOMESTIC SOURCES ON THE STUDY OF SEISMIC PROCESSES IN GLACIERS UNDER THE INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE

N. N. Mikhailova*, A. S. Mukambayev, V. G. Morozov, Ye. N. Kazakkov, U. A. Igibayev

RSE NNC RK Branch "Institute of Geophysical Research", Kurchatov, Kazakhstan

** E-mail for contacts: mikhailova@kndc.kz*

Global climate change affects almost all spheres of human activity and the world ecosystem as a whole. Temperature rise, in particular, leads to accelerated melting of glaciers, which in turn leads to changes in the flow of glacier-fed rivers. This phenomenon inevitably affects the livelihood of settlements that use water from these rivers.

Seismic and infrasound stations of the NNC monitoring network have been recording ground and air vibrations for many years. The accumulated database of instrumental observations contains information on climate changes in previous decades, such as the frequency and spatial distribution of glacial earthquakes.

In this regard, it is proposed to analyze the changes in the glacier destruction regime based on the study of seismic and infrasound data obtained over the last two decades by the Kazakhstan monitoring network and to study the relationship of the found patterns with global climate change.

This paper describes modern ideas about climate influence on mountain glaciers, general information about changes in the size and condition of glaciers in Kazakhstan. The possibility of using cryoseismology as a new tool for studying the dynamics of glacier changes is considered. The paper concludes with the results of the study of glacier dynamics using seismic methods in the Tien-Shan area according to the literature data.

Keywords: *seismology, climate, glaciers, cryoseismology, glacial earthquakes, daily variations.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-74-82
УДК 621.039.5:502.3:614.876

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОАКТИВНЫХ ВЫБРОСОВ АЭС С РАЗНЫМИ ТИПАМИ РЕАКТОРОВ ПРИ ШТАТНОМ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ И ДЛЯ СЦЕНАРИЕВ ПРОЕКТНЫХ И ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЙ

М. К. Мукушева[1*], С. И. Спиридонов[2], Р. А. Микаилова[2]

[1] РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Астана, Казахстан
[2] НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ, Москва, Россия

** E-mail для контактов: mukusheva@nnc.kz*

Выполнен системный анализ атмосферных выбросов российских АЭС с разными типами реакторов при штатном функционировании, а также выбросов для сценариев проектных и запроектных аварий. На основе изучения многолетних данных, определены основные радионуклиды – вкладчики в суммарную активность. Проанализирован состав выбросов при постулируемых авариях на кипящих водо-водяных реакторах (BWR) и реакторах под давлением (PWR). Полученные результаты рассматриваются в качестве исходных данных для расчета дозовой нагрузки на население от выбросов АЭС и формирования перечней основных дозообразующих радионуклидов. Необходимыми компонентами таких расчетов являются модели, параметризованные на основе региональных данных. Ранжирование в системе "радионуклид – компонент окружающей среды" рассматривается в качестве важного этапа при разработке регламента радиоэкологического мониторинга зоны расположения АЭС.

***Ключевые слова**: АЭС, реакторные установки, атмосферные выбросы, аварийные сценарии, доза облучения населения, радионуклиды, радиоэкологический мониторинг.*

Введение

Одним их условий развития ядерной энергетики, наряду с экономической конкурентоспособностью, полным использованием сырьевого потенциала, технологической поддержкой режима нераспространения, является ее экологическая приемлемость. Предприятия ядерного топливного цикла оказывают многофакторное воздействие на окружающую среду, однако повышенное внимание общественности приковано к радиационному фактору, специфичному для ядерного энергопроизводства [1].

В Санитарных правилах проектирования и эксплуатации атомных электростанций (СП АС-03) установлены квоты на облучение населения от радиоактивных выбросов и сбросов АЭС [2]. Дозовая квота для газоаэрозольных выбросов действующей атомной электростанции составляет 200 мкЗв/год, для строящейся или проектируемой АЭС – 50 мкЗв/год. В качестве нижней границы дозы облучения населения в режиме нормальной эксплуатации АЭС задано значение 10 мкЗв в год.

Для адекватной оценки соблюдения указанных дозовых пределов необходимо рассчитать дозы облучения населения с использованием:

- исходных данных, характеризующих активности радионуклидов в составе выбросов;
- миграционно-дозиметрических моделей, при разработке которых учитываются особенности дозообразующих радионуклидов;
- совокупности метеорологических и радиоэкологических параметров, отражающих специфику региона расположения АЭС.

Следует подчеркнуть, что оценка суммарных доз облучения населения и обоснованное сопоставление этих показателей с дозовыми пределами возможно только в том случае, если исходные данные включают основные дозообразующие радионуклиды. Различие в данных по составу атмосферных выбросов, может оказать существенное влияние на результаты оценок. Так, для Ростовской АЭС расчет по данным, характеризующих выбросы 2007 г., показал, что наибольший вклад в дозовую нагрузку вносил пероральный путь облучения, а по данным 2011 г. – облако выброса [3]. Основные дозообразующие радионуклиды в указанные годы – ^{131}I и ^{135}Xe соответственно.

В нормативном документе [2] в перечень контролируемых радионуклидов, определяющих дозовую нагрузку, включены только ^{131}I, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{60}Co и суммарное количество инертных радиоактивных газов (ИРГ). В методике [4] представлен перечень из 15 радионуклидов (^{3}H, ^{14}C, ^{24}Na, ^{41}Ar, ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85m}Kr, ^{87}Kr, ^{88}Kr, ^{90}Sr, ^{131}I, ^{133}Xe, ^{135}Xe, ^{134}Cs, ^{137}Cs.), для которых должны устанавливаться предельно-допустимые выбросы.

Вклады отдельных радионуклидов в дозу облучения населения, рассчитанные на основе экспериментов по измерению удельной активности радионуклидов в вентиляционных трубах АЭС, приведены в работе [5]. Согласно этим оценкам составы основных дозообразующих радионуклидов варьируют в зависимости от типов реакторных установок. К основным дозообразующим радионуклидам в подавляющем числе случаев относятся ^{14}C и ^{3}H.

Радиоэкологическая значимость этих радионуклидов подтверждена в результате расчетов для планируемых выбросов перспективных реакторных установок ВВЭР-1200 и БРЕСТ-ОД-300 [6]. Следует подчеркнуть, что расчеты дозовых нагрузок от ^{14}C и ^{3}H [5, 6]

проводились с использованием моделей, основанных на допущении о равновесии между радионуклидом и его стабильным изотопом во всех компонентах природной среды [7]. Для более реальной оценки (по сравнению с консервативной) целесообразно учитывать региональные рационы питания населения.

При оценке соблюдения дозовых пределов можно использовать не только данные по выбросам радионуклидов в атмосферу, но и результаты радиоэкологического мониторинга (РЭМ) в регионах расположения АЭС. Важным элементом РЭМ является (как и при контроле за атмосферными выбросами) перечень определяемых радионуклидов. Так, в методических указаниях [8] и научных публикациях [9] представлены такие перечни в рамках регламента мониторинга агроэкосистем в зоне воздействия АЭС при штатном режиме эксплуатации и для аварийных ситуаций.

Согласно «штатному» перечню, в почве, продукции растениеводства, кормопроизводства и животноводства следует определять содержание значительного количества радионуклидов – продуктов деления (^{95}Zr, ^{95}Nb, ^{90}Sr, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{131}I) и продуктов активации (^{51}Cr, ^{54}Mn, ^{58}Co, ^{60}Co, ^{59}Fe). Кроме того, рекомендуется измерять содержание ^{3}H в воде в период орошения или лова рыбы. В состав «аварийного» перечня включены ^{95}Zr, ^{95}Nb, ^{90}Sr, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{131}I, ^{103}Ru, ^{106}Ru, ^{144}Ce, ^{140}Ba, ^{140}La, ^{3}H (в воде и рыбе), а также ^{90}Y – дочерний изотоп ^{90}Sr. Необходимо отметить, что совокупности контролируемых в ходе РЭМ радионуклидов [8, 9], рекомендованы для АЭС с любыми типами реакторов.

Для оптимизации регламента РЭМ целесообразно сформировать перечни основных дозообразующих радионуклидов станционного происхождения, содержащихся в компонентах окружающей среды (ОС). В работе [6] представлены результаты радиоэкологического ранжирования радионуклидов, накопленных в компонентах ОС (виды агропродукции, воздух, почва). Так, основными вкладчиками в дозовую нагрузку на население от выбросов реактора ВВЭР-1200 являются ^{14}C и ^{3}H, содержащиеся в продукции растениеводства и животноводства. Результаты расчета парциальных дозовых нагрузок и ранжирование в системе «радионуклид – компонент ОС» будут зависеть от типа реакторной установки, определяющей состав радиоактивных выбросов.

При расчетах [6] в качестве исходных данных рассматривались плановые выбросы атомных электростанций. Однако, для функционирующих АЭС активности отдельных радионуклидов в фактических выбросах могут отличаться от плановых значений. Это отличие может повлиять результат оценки дозовой нагрузки за счет эффекта накоплении долгоживущих радионуклидов в почве в течение длительного времени работы АЭС. По этой причине представляет интерес расчет динамики дозовой нагрузки на население на основе данных фактических выбросов.

Таким образом, на основе краткого обзора можно сделать вывод о необходимости системных расчетных оценок, нацеленных на выявление основных дозообразующих радионуклидов в составе выбросов различных АЭС, и формирование перечней изотопов, определяемых в ходе мониторинга. Важным элементов расчетов являются полновесные исходные данные по выбросам АЭС.

Радиоактивные выбросы при штатном функционировании АЭС

Анализ данных о фактических радиоактивных выбросах российских АЭС за 20-летний период выполнен с использованием литературных источников, характеризующих радиационную обстановку на территории России и сопредельных государств ([10, 11] и другие аналогичные публикации). В составах выбросов в период с 2002 г. по 2021 г. зафиксированы радионуклиды, образовавшиеся в процессе ядерного деления и продукты активации – ^{60}Co, ^{90}Sr, ^{131}I, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{3}H, ^{14}C, ^{41}Ar, ^{87}Kr, ^{88}Kr, ^{133}Xe, ^{135}Xe, ^{135m}Xe, ^{138}Xe, ^{85m}Kr, ^{54}Mn, ^{59}Fe, ^{58}Co, ^{95}Zr, ^{110m}Ag, ^{133}I, ^{140}Ba, ^{65}Zn, ^{124}Sb, ^{24}Na и ИРГ.

Следует отметить, что ^{60}Co, ^{131}I, ^{134}Cs, ^{137}Cs и ИРГ детектировались на всех АЭС в течение всего рассматриваемого периода (2002–2021 гг.) В качестве примера, на рисунке 1 представлена динамика активности годовых выбросов ^{131}I. Количество контролируемых радионуклидов увеличилось после 2015 г. Так, тритий детектируется на Балаковской АЭС с 2015 г, а на других АЭС – с 2018 г. (рисунок 2). С 2018 г. ^{14}C детектируется на Ленинградской, Нововоронежской и Смоленской АЭС, а с 2020 г. – на всех атомных станциях (рисунок 3).

Динамика контроля ^{90}Sr в выбросах российских АЭС носит «противоположный характер» по отношению к динамике контроля за активностью ^{3}H и ^{14}C. Этот радионуклид детектировался на некоторых станциях в период 2002–2004 гг. и в 2019 г. на Белоярской АЭС. В настоящее время ^{90}Sr не подлежит контролю ни на одной российской АЭС.

Инертные радиоактивные газы в выбросах в основном характеризовались суммарной активностью, но после 2018 г. в [10, 11] представлены значения выбрасываемой активности для отдельных ИРГ. Остальные радионуклиды из представленного выше перечня, кроме ^{124}Sb, также присутствовали в выбросах отдельных станций в разные годы. Изотоп ^{124}Sb регистрировался только на Нововоронежской АЭС с 2018 г.

На основе данных о фактических радиоактивных выбросах российских АЭС за 20-летний период были оценены вклады отдельных радионуклидов в суммарную активность выброса. Эти вклады зависят от характеристик конкретной АЭС (типа реакторной установки и систем очистки) и меняются в течение времени работы станции. Изменение может быть обусловлено не только объективными, но и субъективными причинами, к которым относится коррекция перечня контролируемых радионуклидов.

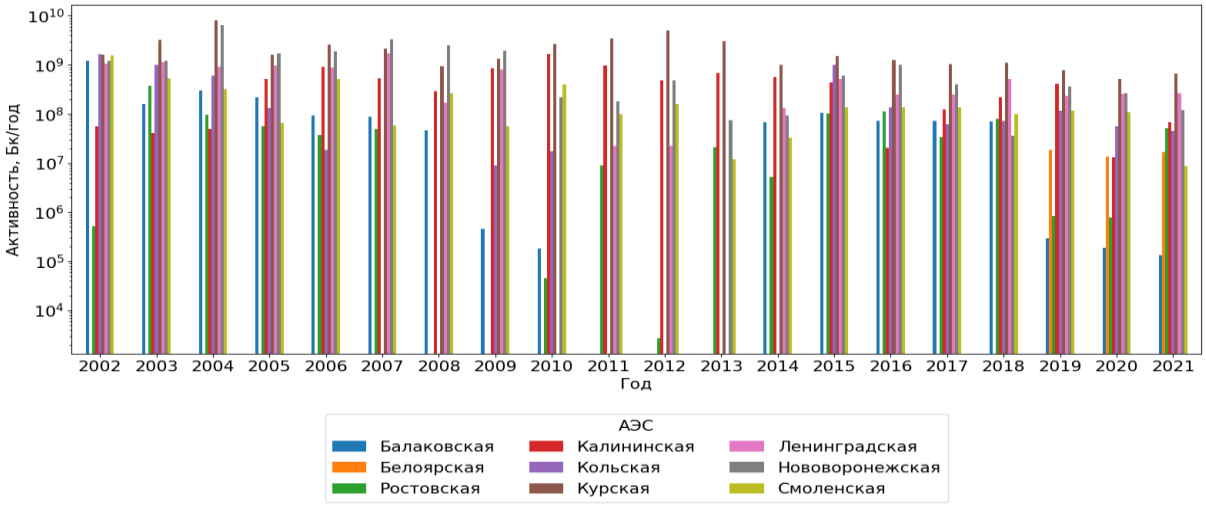


Рисунок 1. Динамика активности ^{131}I в годовых выбросах АЭС

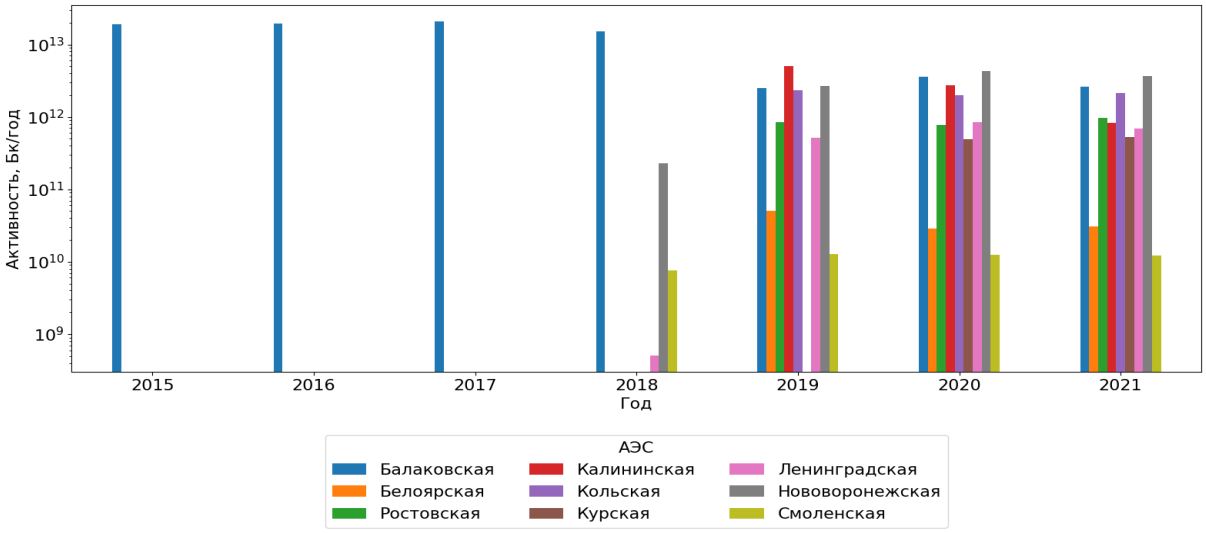


Рисунок 2. Динамика активности ^{3}H в годовых выбросах АЭС

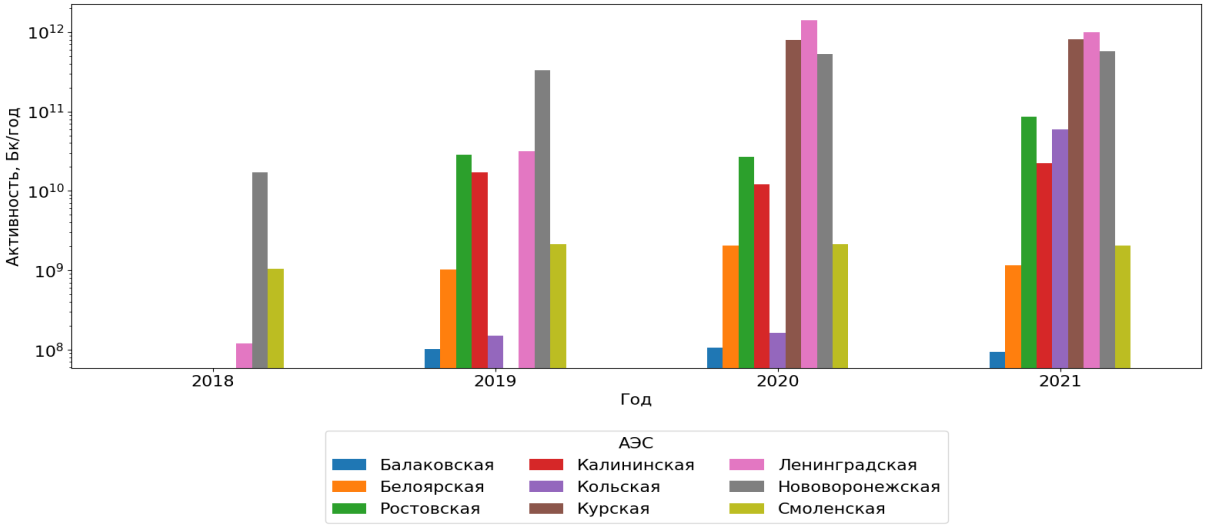


Рисунок 3. Динамика активности ^{14}C в годовых выбросах АЭС

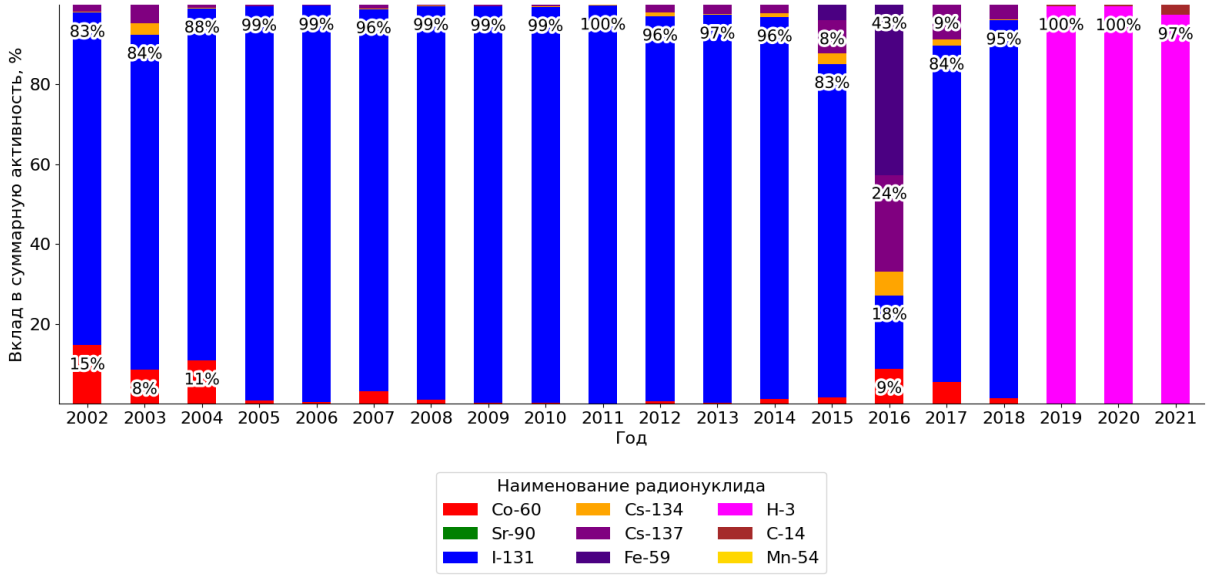


Рисунок 4. Вклады отдельных радионуклидов в суммарную активность выбросов Калининской АЭС *(без учета ИРГ)*

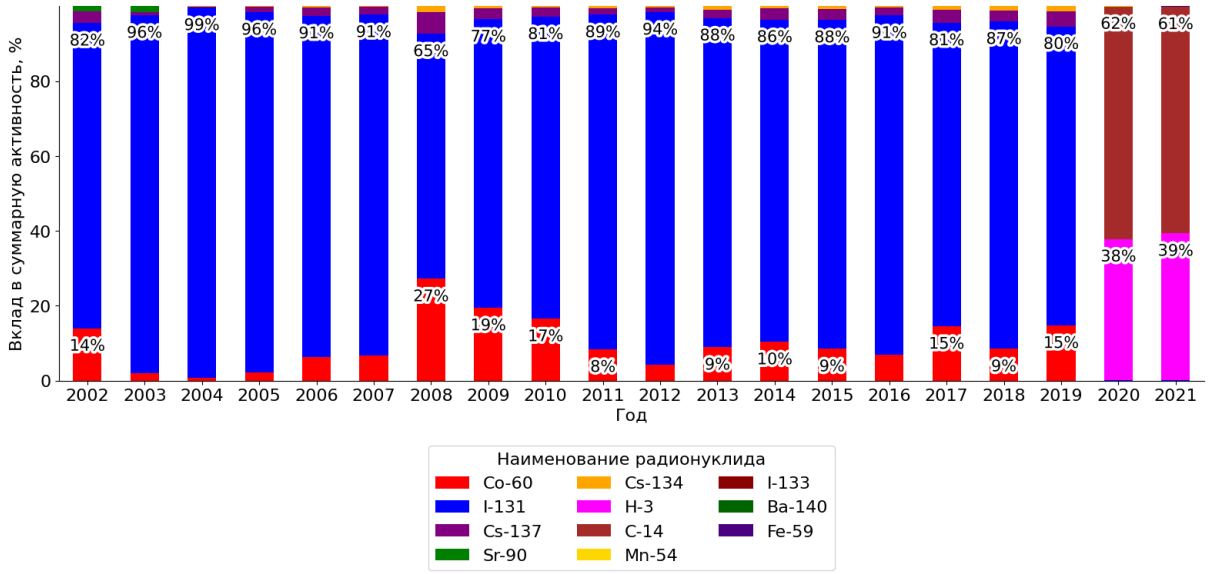


Рисунок 5. Вклады отдельных радионуклидов в суммарную активность выбросов Курской АЭС (без учета ИРГ)

В качестве примера, на рисунках 4 и 5 представлена динамика процентных вкладов радионуклидов в активность годового выброса двух АЭС с реакторами различных типов за минусом активности ИРГ. Такое представление информации целесообразно в силу того, что активность ИРГ существенно превышает активность других радионуклидов, вклады которых будут слабо различимы при графическом представлении.

В период 2002–2017 гг. наибольший вклад в суммарную активность годового выброса Нововоронежской АЭС с реакторами ВВЭР-1000 (без учета ИРГ) вносил ^{131}I (рисунок 4). Начиная с 2019 г. после корректировки списка контролируемых радионуклидов превалирующим изотопом стал ^{3}H.

Аналогичная ситуация наблюдается на Курской АЭС, выбросы которой в 2018 г. и в последующие годы стали формировать ^{3}H и ^{14}C (рисунок 5). При этом вклад ^{14}C в суммарную активность выбросов (за исключением ИРГ) является превалирующим (свыше 60%) в силу специфики реакторов РБМК-1000 с графитовым замедлителем.

РАДИОАКТИВНЫЕ ВЫБРОСЫ ДЛЯ СЦЕНАРИЕВ ПРОЕКТНЫХ И ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЙ

В таблице 1 представлена обобщенная характеристика сценариев постулируемых аварий на российских АЭС с различными типами водо-водяных реак-

торов [12–15]. По степени тяжести аварии делятся на проектные (ПА), максимальные проектные (МПА) и запроектные (ЗА) аварии. Реакторы различной модификации различаются как по количеству аварийных сценариев, так и по суммарным активностям выбросов.

Сценарии с наибольшими активностями выбросов характерны для реактора ВВЭР-440, с наименьшими активностями – для реактора ВВЭР-1200. Следует подчеркнуть, что вероятности аварийных событий на АЭС с рассматриваемыми реакторными установками являются очень малыми величинами (10^{-7}–10^{-5} год$^{-1}$).

На рисунке 6 отражены вклады отдельных радионуклидов в суммарные активности выбросов для различных сценариев постулируемых аварий на АЭС с водо-водяными реакторами. Анализ этих данных показывает, что наибольший вклад в суммарную активность аварийных выбросов вносят ИРГ.

Таблица 1. Общая характеристика аварийных сценариев, разработанных для российских АЭС с различными типами водо-водяных реакторов

Реактор	Сценарии	Суммарная активность, ТБк	Высота выброса, м	Вероятность, год$^{-1}$	Кол-во радионуклидов	Тип аварии
ВВЭР-1200	1	$1{,}15\cdot10^{2}$	30	10^{-6}	18	МПА
	2	$1{,}49\cdot10^{4}$	30	10^{-7}	40	ЗА
ВВЭР-1000	1	$2{,}42\cdot10^{2}$	25	10^{-6}	12	МПА
	2	$4{,}50\cdot10^{4}$	25	10^{-7}	13	ЗА
	3	$5{,}73\cdot10^{4}$	30	10^{-7}	17	МПА
ВВЭР-440	1	$1{,}51\cdot10^{1}$	50	$5{,}20\cdot10^{-5}$	17	ПА
	2	$1{,}98\cdot10^{1}$	50	$5{,}20\cdot10^{-5}$	17	ПА
	3	$8{,}49\cdot10^{1}$	50	$5{,}20\cdot10^{-5}$	17	ПА
	4	$1{,}15\cdot10^{2}$	50	$5{,}20\cdot10^{-5}$	17	ПА
	5	$1{,}48\cdot10^{-4}$	120	$5{,}20\cdot10^{-5}$	14	ПА
	6	$2{,}36\cdot10^{-4}$	120	$5{,}20\cdot10^{-5}$	15	ПА
	7	$4{,}02\cdot10^{-4}$	120	$5{,}20\cdot10^{-5}$	15	ПА
	8	$2{,}12\cdot10^{-3}$	120	$5{,}20\cdot10^{-5}$	16	ПА
	9	7,56	120	$5{,}20\cdot10^{-5}$	17	ПА
	10	$1{,}09\cdot10^{1}$	120	$5{,}20\cdot10^{-5}$	17	ПА
	11	$1{,}52\cdot10^{1}$	120	$5{,}20\cdot10^{-5}$	17	ПА
	12	$3{,}67\cdot10^{3}$	120	$5{,}20\cdot10^{-5}$	13	ЗА
	13	$4{,}39\cdot10^{4}$	120	$5{,}20\cdot10^{-5}$	13	ЗА
	14	$2{,}85\cdot10^{4}$	120	$5{,}20\cdot10^{-5}$	13	ЗА
	15	$3{,}46\cdot10^{5}$	120	$5{,}20\cdot10^{-5}$	13	ЗА
	16	$2{,}27\cdot10^{5}$	120	$5{,}20\cdot10^{-5}$	13	ЗА
	17	$4{,}59\cdot10^{5}$	40	$5{,}20\cdot10^{-5}$	13	ЗА
	18	$1{,}18\cdot10^{7}$	40	$5{,}20\cdot10^{-5}$	13	ЗА
	19	$2{,}62\cdot10^{3}$	40	$5{,}20\cdot10^{-5}$	13	ЗА
	20	$3{,}59\cdot10^{4}$	40	$5{,}20\cdot10^{-5}$	13	ЗА

Совокупность сценариев запроектных аварий на АЭС с ВВЭР-440 существенным образом отличается от сценариев, разработанных для АЭС с другими типами реакторов. Так, суммарная активность выброса для сценария №18 сопоставима с активностью выбросов при авариях на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима». Вклад ИРГ и изотопов йода согласно этому сценарию составляет 72,2 и 27,5% соответственно.

Сценарии аварий зарубежных реакторов характеризуются как большим количеством радионуклидов в выбросе, так и, в некоторых случаях, более высокой суммарной активностью. В таблице 2 приведены сводные данные по авариям на АЭС с реактором PWR-890 (АЭС Сарри, США), кипящим водяным реактором BWR-1412 (АЭС Пич Боттом, США) и реактором с водой под давлением третьего поколения EPR-1600 (АЭС Хинкли Пойнт Си, Великобритания) [16–18]. Вероятности аварий для реакторов более ранних поколений (10^{-5} год$^{-1}$ для PWR-890) превышают значение этого показателя для реактора третьего поколения (от 10^{-7} до 10^{-13} год$^{-1}$ для EPR-1600).

Таблица 2. Основные характеристики аварийных сценариев [16–18]

Реактор	Сценарии	Суммарная активность, ТБк	Высота выброса, м	Вероятность, год$^{-1}$	Кол-во радионуклидов
PWR-890	1	$7{,}51\cdot10^{6}$	8,4	$1{,}0\cdot10^{-5}$–$2{,}0\cdot10^{-5}$	69
	2	$7{,}33\cdot10^{6}$	8,4	$1{,}0\cdot10^{-6}$–$2{,}0\cdot10^{-6}$	69
	3	$1{,}38\cdot10^{6}$	24,6	$4{,}0\cdot10^{-7}$	69
	4	$5{,}79\cdot10^{6}$	24,6	$4{,}0\cdot10^{-7}$	69
BWR-1412	1	$1{,}76\cdot10^{7}$	39,6	$3{,}0\cdot10^{-6}$	67
	2	$1{,}74\cdot10^{7}$	39,6	$3{,}0\cdot10^{-7}$	67
	3	$2{,}38\cdot10^{7}$	39,6	$3{,}0\cdot10^{-7}$	67
EPR-1600	1	$5{,}70\cdot10^{4}$	34,7	$1{,}49\cdot10^{-7}$	54
	2	$1{,}90\cdot10^{5}$	60,7	$4{,}84\cdot10^{-7}$	54
	3	$2{,}12\cdot10^{7}$	35,7	$8{,}06\cdot10^{-12}$	54
	4	$2{,}23\cdot10^{7}$	35,7	$5{,}84\cdot10^{-12}$	54
	5	$2{,}18\cdot10^{7}$	35,7	$1{,}02\cdot10^{-8}$	54
	6	$2{,}37\cdot10^{7}$	35,7	$6{,}98\cdot10^{-9}$	54
	7	$2{,}06\cdot10^{7}$	35,7	$2{,}67\cdot10^{-11}$	54
	8	$2{,}11\cdot10^{7}$	35,7	$8{,}37\cdot10^{-12}$	54
	9	$2{,}07\cdot10^{7}$	35,7	$1{,}23\cdot10^{-9}$	54
	10	$2{,}16\cdot10^{7}$	35,7	$1{,}09\cdot10^{-9}$	54
	11	$1{,}58\cdot10^{7}$	35,7	$6{,}51\cdot10^{-13}$	54
	12	$2{,}02\cdot10^{7}$	35,7	$3{,}96\cdot10^{-11}$	54
	13	$2{,}02\cdot10^{7}$	35,7	$1{,}27\cdot10^{-9}$	54
	14	$2{,}02\cdot10^{7}$	35,7	$3{,}29\cdot10^{-8}$	54
	15	$2{,}65\cdot10^{6}$	24,7	$4{,}14\cdot10^{-9}$	54
	16	$1{,}11\cdot10^{7}$	24,7	$5{,}01\cdot10^{-9}$	54
	17	$1{,}04\cdot10^{8}$	10	$3{,}83\cdot10^{-9}$	54

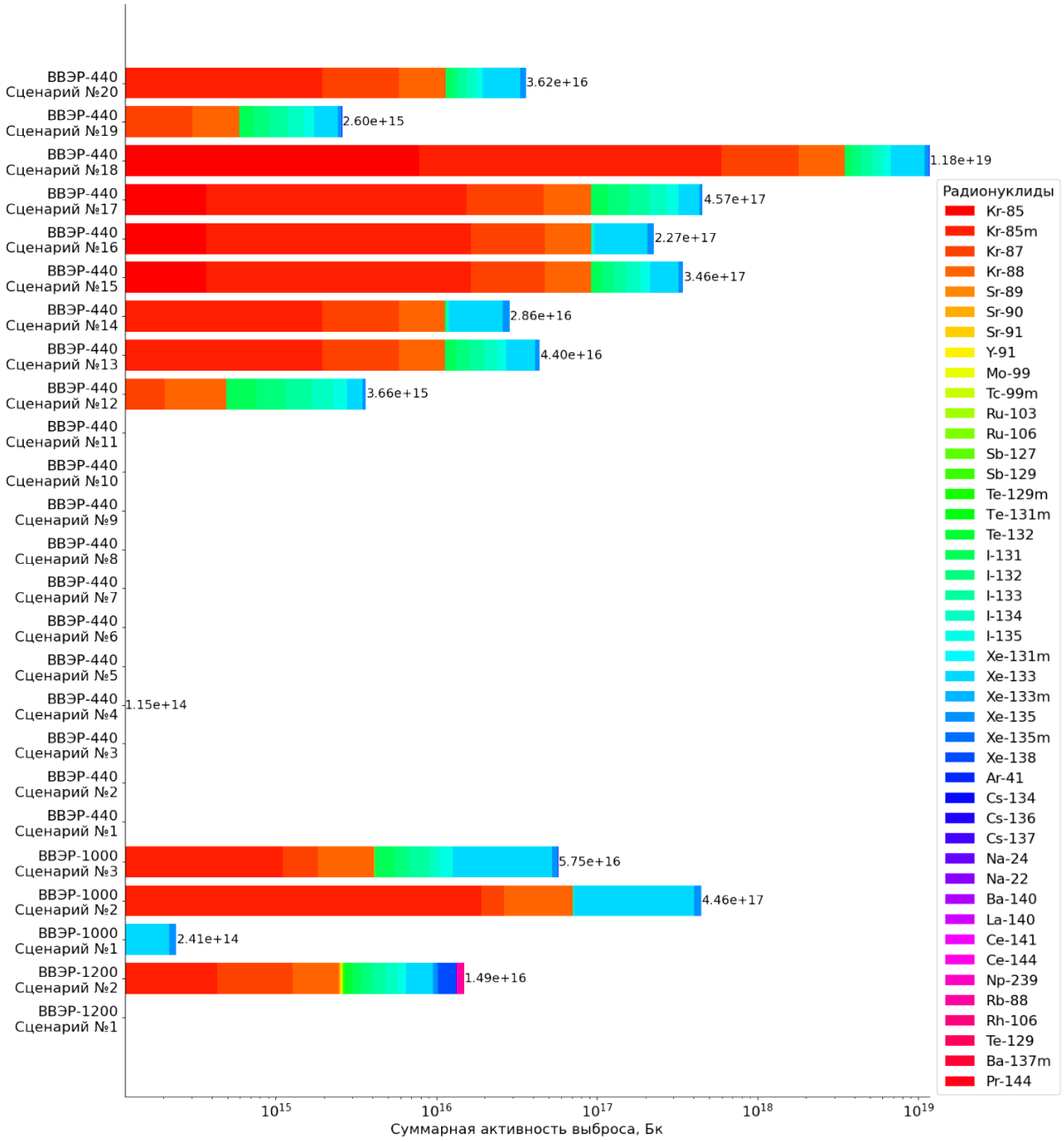


Рисунок 6. Вклады отдельных радионуклидов в суммарные активности выбросов для различных сценариев постулируемых аварий на АЭС с водо-водяными реакторами

Заключение

В данной работе выполнено обоснование необходимости радиоэкологического ранжирования радионуклидов, выбрасываемых АЭС, для определения основных дозообразующих изотопов. Результаты ранжирования являются основой формирования перечней радионуклидов, контролируемых в ходе радиоэкологического мониторинга. Согласно [9], регламенты РЭМ разрабатываются для штатного режима эксплуатации АЭС и для случая потенциальных радиационных аварий. Расчетные оценки во всех случаях должны базироваться на полновесных исходных данных, характеризующих активности поступающих в атмосферу радионуклидов.

Выполнен системный анализ атмосферных выбросов функционирующих российских АЭС с разными типами реакторов и определены основные радионуклиды – вкладчики в суммарную активность. Проведен обзор характеристик выбросов при проектных и запроектных авариях на реакторах «линейки» ВВЭР, а также при постулируемых авариях на АЭС с реакторами BWR и PWR.

При разработке регламента РЭМ целесообразно опираться на результаты ранжирования в системе

«радионуклид – компонент ОС», основанного на расчете парциальных дозовых нагрузок. Необходимыми составляющими таких расчетов, кроме исходных данных по выбросам, являются модели [19], параметризованные на основе региональной информации. Для радиоэкологически значимых радионуклидов ^{3}H и ^{14}C целесообразно использовать расчетные модули, учитывающие региональные особенности в отличие от подхода, обеспечивающего консервативную оценку [7].

Финансирование

Данные исследования финансировались Министерством энергетики Республики Казахстан в рамках научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» (ИРН – BR24792713)

Литература

1. Алексахин Р.М. Актуальные экологические проблемы ядерной энергетики // Атомная энергия. – 2013. – Т. 114. – Вып. 5. – С. 243–249.
2. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03). Санитарные правила и гигиенические нормативы СанПин 2.6.1.24-03. М.: Минздрав России. – 2003. – 41 с.
3. Шарпан Л.А., Карпенко Е.И., Спиридонов С.И. Оценка дозы облучения населения в результате атмосферных выбросов Ростовской АЭС // Атомная энергия. – 2013. – Т. 115. – Вып. 3. – С. 163–166.
4. Разработка и установление нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ атомных станций в атмосферный воздух. Методика. МТ 1.2.2.15.1176-2016. АО «Концерн Росэнергоатом». – 2016. – 76 с.
5. Vasyanovich M.E., Ekidin A.A., Vasilyev A.V., Kryshev A.I., Kosykh I.V., Kapustin I.A. Determination of radionuclide composition of the Russian NPPs atmospheric releases and dose assessment to population // Journal of Environmental Radioactivity. – 2019. – Vol. 208–209. – P. 106006.
6. Спиридонов С.И., Микаилова Р.А., Нуштаева В.Э. К вопросу об оценке соблюдения квоты на облучение населения от газоаэрозольных выбросов АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2021, – Т. 61. – № 6. – С. 667–673.
7. Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. Saf. Rep. Ser. No. 19. Vienna: IAEA. – 2001. – 229 p.
8. Организация государственного радиоэкологического мониторинга агроэкосистем в зоне воздействия радиационно-опасных объектов. Методические указания. МУ 13.5.13-00. М.: РАСХН. – 2005. – 35 с.
9. Мониторинг природных и аграрных экосистем в районах расположения атомных электростанций: Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ. Выпуск 3 / Под. ред. проф. С.В. Фесенко. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ. – 2020. – 170 с.
10. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2020 году. Ежегодник / Под ред. В.М. Шершакова, В.Г. Булгакова, С.М. Вакуловского и др. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». – 2021. – 332 с.
11. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2021 году. Ежегодник / Под ред. В.М. Шершакова, В.Г. Булгакова, С.М. Вакуловского и др. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». – 2022. – 342 с.
12. Ehrhardt J., Weiss A. Rodos: Decision support system for off-site nuclear emergency management in Europe. Report EUR 19144, ISBN No.92-828-9773-7. – 2000. – P. 259.
13. БЕЛНИПИЭНЕРГОПРОМ. Обоснование инвестирования в строительство атомной электростанции в Республике Беларусь. Книга 11. Оценка воздействия на окружающую среду. 1588-ПЗ-ОИ4. Часть 8. Отчёт об ОВОС. Часть 8.3. Оценка воздействия АЭС на окружающую среду. – 2010. – 137 с.
14. БЕЛНИПИЭНЕРГОПРОМ. Обоснование инвестирования в строительство атомной электростанции в Республике Беларусь. Этап 4. Оценка воздействия на окружающую среду. 1588 – ПЗ – ОИ4. КНИГА 4. Раздел 9. Характеристика окружающей среды и оценка воздействий на неё БелАЭС. – 2009. – 209 с.
15. СПбАЭП. Оценка воздействия на окружающую среду. Том 1. Книга 2. БЛ.4-0-0-ОВОС-001/2. Санкт-Петербург. – 2012. – 423 с.
16. State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses Project Volume 2: Surry Integrated Analysis (NUREG/CR-7110, Volume 2, Revision 1). Office of Nuclear Regulatory Research. – 2013.
17. State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses Project Volume 1: Peach Bottom Integrated Analysis (NUREG/CR-7110, Volume 1, Revision 1). Office of Nuclear Regulatory Research. – 2013.
18. Hinkley Point C Pre-Construction Safety Report. NNB Generation Company Limited, United Kingdom. – 2012.
19. Мукушева М.К., Спиридонов С.И., Микаилова Р.А., Топорова А. В. Сравнительный анализ программных средств для прогнозирования радиоэкологических последствий штатных и аварийных выбросов АЭС для населения // Вестник НЯЦ РК. – 2024. – Вып. 1 (97). – С. 89 – 94. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-1-89-95

References

1. Aleksakhin R.M. Aktual'nye ekologicheskie problemy yadernoy energetiki // Atomnaya energiya. – 2013. – Vol. 114. – Issue 5. – P. 243–249.
2. Sanitarnye pravila proektirovaniya i ekspluatatsii atomnykh stantsiy (SP AS-03). Sanitarnye pravila i gigienicheskie normativy SanPin 2.6.1.24-03. Moscow: Minzdrav Rossii. – 2003. – 41 p.
3. Sharpan L.A., Karpenko E.I., Spiridonov S.I. Otsenka dozy oblucheniya naseleniya v rezul'tate atmosfernykh vybrosov Rostovskoy AES // Atomnaya energiya. – 2013. – Vol. 115. – Issue 3. – P. 163–166.
4. Razrabotka i ustanovlenie normativov predel'no dopustimykh vybrosov radioaktivnykh veshchestv atomnykh stantsiy v atmosfernyy vozdukh. Metodika. MT 1.2.2.15.1176-2016. AO “Kontsern Rosenergoatom”. – 2016. – 76 p.
5. Vasyanovich M.E., Ekidin A.A., Vasilyev A.V., Kryshev A.I., Kosykh I.V., Kapustin I.A. Determination of radionuclide composition of the Russian NPPs atmospheric releases and dose assessment to population // Journal of

Environmental Radioactivity. – 2019. – Vol. 208–209. – P. 106006.
6. Spiridonov S.I., Mikailova R.A., Nushtaeva V.E. K voprosu ob otsenke soblyudeniya kvoty na obluchenie naseleniya ot gazoaerozol'nykh vybrosov AES // Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. – 2021, –Vol. 61. – No. 6. – P. 667–673.
7. Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. Saf. Rep. Ser. No. 19. Vienna: IAEA. – 2001. – 229 p.
8. Organizatsiya gosudarstvennogo radioekologicheskogo monitoringa agroekosistem v zone vozdeystviya radiatsionno-opasnykh ob"ektov. Metodicheskie ukazaniya. MU 13.5.13-00. Moscow: RASKhN. – 2005. – 35 p.
9. Monitoring prirodnykh i agrarnykh ekosistem v rayonakh raspolozheniya atomnykh elektrostantsiy: Trudy FGBNU VNIIRAE. Vypusk 3 / Pod. red. prof. S.V. Fesenko. Obninsk: FGBNU VNIIRAE. – 2020. – 170 p.
10. Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nykh gosudarstv v 2020 godu. Ezhegodnik / Pod red. V.M. Shershakova, V.G. Bulgakova, S.M. Vakulovskogo i dr. Obninsk: FGBU "VNIIGMI-MTsD". – 2021. – 332 p.
11. Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nykh gosudarstv v 2021 godu. Ezhegodnik / Pod red. V.M. Shershakova, V.G. Bulgakova, S.M. Vakulovskogo i dr. Obninsk: FGBU "VNIIGMI-MTsD". – 2022. – 342 p.
12. Ehrhardt J., Weiss A. Rodos: Decision support system for off-site nuclear emergency management in Europe. Report EUR 19144, ISBN No.92-828-9773-7. – 2000. – P. 259.
13. BELNIPIENERGOPROM. Obosnovanie investirovaniya v stroitel'stvo atomnoy elektrostantsii v Respublike Belarus'. Kniga 11. Otsenka vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu. 1588-PZ-OI4. Chast' 8. Otchet ob OVOS. Chast' 8.3. Otsenka vozdeystviya AES na okruzhayushchuyu sredu. – 2010. – 137 p.
14. BELNIPIENERGOPROM. Obosnovanie investirovaniya v stroitel'stvo atomnoy elektrostantsii v Respublike Belarus'. Etap 4. Otsenka vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu. 1588 – PZ – OI4. KNIGA 4. Razdel 9. Kharakteristika okruzhayushchey sredy i otsenka vozdeystviy na nee BelAES. – 2009. – 209 p.
15. SPbAEP. Otsenka vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu. Tom 1. Kniga 2. BL.4-0-0-OVOS-001/2. Sankt-Peterburg. – 2012. – 423 p.
16. State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses Project Volume 2: Surry Integrated Analysis (NUREG/CR-7110, Volume 2, Revision 1). Office of Nuclear Regulatory Research. – 2013.
17. State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses Project Volume 1: Peach Bottom Integrated Analysis (NUREG/CR-7110, Volume 1, Revision 1). Office of Nuclear Regulatory Research. – 2013.
18. Hinkley Point C Pre-Construction Safety Report. NNB Generation Company Limited, United Kingdom. – 2012.
19. Mukusheva M.K., Spiridonov S.I., Mikailova R.A., Toporova A. V. Comparative Analysis of Software Tools to Predict the Radioecological Consequences after Routine and Accidental Emissions by NPP for the Population // NNC RK Bulletin. – 2024. – Issue 1 (97). – P. 89 – 94. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-1-89-95

ӘРТҮРЛІ ТИПТІ РЕАКТОРЛАРДАҒЫ АЭС-тің ШТАТТЫҚ ЖҰМЫС ІСТЕУ КЕЗІНДЕГІ, ЖОБАЛЫҚ ЖӘНЕ ЖОБАДАН ТЫС АВАРИЯЛАРДЫҢ СЦЕНАРИЙЛЕРІНЕ АРНАЛҒАН РАДИОАКТИВТІ ШЫҒАРЫНДЫЛАРДЫҢ СИПАТТАМАЛАРЫН ТАЛДАУ

М. К. Мукушева[1*], С. И. Спиридонов[2], Р. А. Микаилова[2]

[1] «Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы» РМК, Курчатов, Қазақстан
[2] «Курчатов институты» ҒЗО – ВНИИРАЭ, Мәскеу, Ресей

** Байланыс үшін E-mail: mukusheva@nnc.kz*

Ресейлік әртүрлі типті реакторлардағы АЭС-тің атмосфералық шығарындыларына, сондай-ақ жобалық және жобадан тыс авариялардың сценарийлеріне арналған шығарындыларға жүйелі талдау жасалды. Көп жылғы деректерді зерделеу негізінде жиынтық белсенділікті жинақтайтын негізгі радионуклидтер анықталды. Қайнайтын сумен жұмыс істейтін су реакторларында (BWR) және қысымдағы реакторларда (PWR) постулатталған авариялар кезіндегі шығарындылардың құрамы талданды. Алынған нәтижелер АЭС шығарындыларынан халыққа түсетін дозалық жүктемені есептеу және негізгі доза түзуші радионуклидтердің тізбесін қалыптастыру үшін бастапқы деректер ретінде қаралады. Мұндай есептеулердің қажетті компоненттері – аймақтық мәліметтер негізінде параметрленген модельдер. «Радионуклид – қоршаған орта компоненті» жүйесіндегі саралау АЭС орналасқан аймақтың радиоэкологиялық мониторинг регламентін әзірлеу кезінде маңызды кезең ретінде қарастырылады.

Түйін сөздер*: АЭС, реактор қондырғылары, атмосфералық шығарындылар, авариялық сценарийлер, халықтың сәулелену дозасы, радионуклидтер, радиоэкологиялық мониторинг.*

ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF RADIOACTIVE RELEASES FROM NPP WITH VARIOUS TYPES OF REACTORS DURING NORMAL OPERATION AS WELL AS FOR THE DESIGN AND BEYOND THE DESIGN BASIS ACCIDENT SCENARIOS

M. K. Mukusheva[1*], S. I. Spiridonov[2], R. A. Mikailova[2]

[1] RSE "National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan", Kurchatov, Kazakhstan
[2] NRC "Kurchatov Institute" – VNIIRAE, Moscow, Russia

** E-mail for contacts: mukusheva@nnc.kz*

System analysis was conducted to examine the atmospheric emissions from Russian nuclear power plants with various types of reactors during normal operation, as well as the emissions for design and beyond-design accident scenarios. Through many years of study, the main radionuclides that contribute to the total activity were identified. The composition of emissions from postulated accidents at the boiling water reactor (BWR) and pressurized water reactor (PWR) has been analyzed. The obtained results are considered as initial data for calculating the dose load on the population from NPP releases and formation of lists of the main dose-forming radionuclides. The necessary components of such calculations are models parameterized on regional data. Ranking in the system "radionuclide – environmental component" is considered as an important stage for developing the Regulation for Environmental Monitoring of the NPP location area.

Keywords: *NPP, reactor facilities, atmospheric emissions, accident scenarios, exposure dose of the population, radionuclides, radioecological monitoring.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-83-90
УДК 29.19.16

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ИМПУЛЬСНОГО УСКОРИТЕЛЯ ДУГОВОЙ ПЛАЗМЫ В ВАКУУМЕ

А. У. Амренова, А. М. Жукешов*, У. Б. Абдыбай, Ж. М. Молдабеков

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

** E-mail для контактов: zhukeshov@physics.kz*

Для получения потока металлической плазмы разработан импульсный ускоритель вакуумной дуги и исследована его работа при вариации уровня вакуума в камере. При использовании электродов с аксиальной симметрией, показано формирование сначала тлеющего, а затем дугового разряда на катоде и дальнейшее ускорение плазмы анодным потенциалом. При высоком уровне вакуума 10^{-4} мбар наблюдали сжатие плазы к оси системы и пинчевание плазмы в собственном магнитном поле. Также работа установки сопровождается генерацией высокоскоростного потока, скорость которого, по крайней мере, на порядок выше скорости основного потока. Обсуждается механизм генерации плазмы и особенности его ускорения, а также условия получения покрытий на установке при различном уровне вакуума. Установка, разработанная в данной работе, отличается простотой конструкции и эффективностью.

Ключевые слова: *плазма, ускоритель, вакуумная дуга, импульсный разряд, диагностика плазмы, покрытия.*

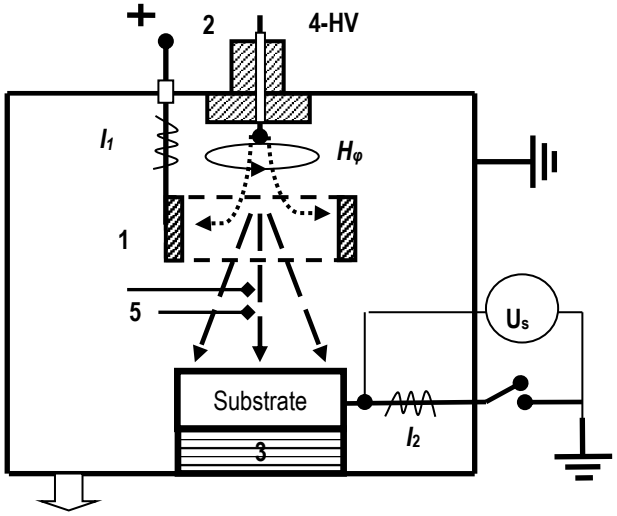
Введение

В последние годы уделяется большое внимание исследованиям в области плазменных технологий, как для получения наноматериалов, так и для нанесения функциональных покрытий. Одним из хорошо изученных методов является вакуумная дуга [1]. Как известно, в вакуумной дуге почти весь разрядный ток концентрируется на катоде в микроскопических (~10 мкм) катодных пятнах, а длительность существования отдельного пятна порядка 10^{-7} с [2]. Из опытов известно, что для поддержания дуги необходим минимальный ток 50 А (в стационарном режиме), а падение напряжения в прикатодной области должно быть 20–40 В [3]. Из теории искрового разряда также известно [4], что для пробоя вакуумного промежутка необходима напряженность поля не менее 10^6 В/см, когда речь идет об автоэмиссии с поверхности катода для формирования искры. При отсутствии нагрева катода или ионизирующего облучения, для зажигания разряда в вакууме применяют инициирующий электрод (триггер), который создает первоначальную искру на поверхности катода. Методы создания первоначальной искры хорошо известны и описаны в литературе [5]. Далее дуговой разряд горит в парах материала катодных пятен и формируется плазма в области падения потенциала. Для удержания пятен на поверхности катода обычно используется тангенциальное магнитное поле. Дальнейшие явления, связанные с формированием потока плазмы в межэлектродном пространстве, особенно процесс генерации и ускорения ионов, остаются недостаточно изученными [6–8]. В частности, до сих пор предметом обсуждения является механизм генерации кратковременных пучков ускоренных многозарядных ионов материала катода, регистрировавшихся еще в ранних экспериментах в высоковольтных искровых разрядах [9].

Как известно, в дуговых ускорителях происходит генерация микрокапель из материала катода, а также их выброс из области высоких давлений в вакуум. Во многих экспериментах исследователи пытаются избавиться от капель металла (микрочастицы размером 1–10 мкм), так как они нарушают однородность структуры осажденного ионного покрытия. Но в некоторых случаях, микрочастицы могут иметь положительное применение, например, при получении порошков. В работах [10, 11] были исследованы основные характеристики генерации микрочастиц (или капель) с катода в дуговых разрядах, но на стационарных установках с током порядка 200 А. Основную роль играет величина тока, температура катода и его материал. Проблемой является низкая эффективность генерации капельной фазы при использовании вакуумно-дугового разряда. Доля капельной составляющей в продуктах эрозии катода чрезвычайно низка для тугоплавких материалов (0,83% для Mo) и не высока для легкоплавких материалов (35,6% для Al). Мы предполагаем, что генерация микрочастиц из катода увеличивается при импульсах тока, значительно превосходящих постоянный ток. Необходимо также исследовать формирование плазмы в аксиальной геометрии электродов без внешнего магнитного поля. В работе [12] описан плазменный ускоритель вакуумной дуги, но его динамические характеристики не приводятся. Учитывая наш опыт эксплуатации импульсного плазменного ускорителя КПУ-30 [13], поставлена задача разработать устройство для распыления в высоком вакууме металлических электродов. В режиме с принудительным импульсным поджигом дуги ожидается формирование металлической плазмы высокой плотности в таком ускорителе при наличии глубокого вакуума в камере. Полученные потоки металлической плазмы предполагается использовать для создания материалов с неоднородной структурой для применения в энергетике и машиностроении.

Методы исследования

Для экспериментов разработана установка импульсной вакуумной дуги, схема работы которой показана на рисунке 1. Катод (2) изготавливался из меди, алюминия, титана и сплава железа в виде цилиндра диаметром 50 мм, анод 1 в виде отрезка трубы из нержавеющей стали, подложка (3) в виде стальных пластин 20×20 мм. Расстояние анод-катод было фиксировано $d = 60$ мм для экспериментов с разными анодами диаметром от 40 до 110 мм. Температуру катода во время работы определяли термопарой К-типа батарейным мультиметром. Подложка охлаждалась проточной водой через керамическую прокладку толщиной 8 мм. Поджигающий электрод (4) выполнен из вольфрамового прутка диаметром 3 мм. Инициирование катодного пятна осуществляется пробоем по кромке керамической трубки, куда вставлен поджигающий электрод с полированным торцом. Внешний диаметр трубки 6 мм, толщина стенки 1 мм. В свою очередь эта трубка вставляется в отверстие в катоде, а торцы трубки и электрода находятся на одной плоскости с поверхностью катода. Первичная плазма образуется на катоде в результате искры по торцевой поверхности керамики от поджигающего электрода.



1 – анод; 2 – катод; 3 – изолятор подложки; 4 – генератор поджига; I_1, I_2 – пояса Роговского; U_s – пик-вольтметр,; 5 – электрические зонды

Рисунок 1. Схема работы установки и методы диагностики импульсной дуги в вакууме

Для инициирования катодного пятна и зажигания дугового разряда используются два источника питания. Импульсный источник HV подключен к поджигающему электроду, а источник постоянного тока к аноду. Генератор высоковольтных импульсов с тиристорным ключом имеет следующие параметры: амплитуда выходного напряжения холостого хода трансформатора ~25 кВ, энергия импульса 5 Дж. Этой энергии достаточно для интенсивного испарения катода и формирования исходного пучка плазмы. Для питания анода использовался сетевой выпрямитель с регулировкой выходного напряжения от 0 до +300 В с использованием автотрансформатора на 40 А. Разрядная емкость в источнике питания анода состояла из импульсных конденсаторов ИМ-100, использовалось параллельное включение от 4 до 12 конденсаторов.

Частота следования импульсов триггера задавалась цифровым генератором в пределах 5-20 Гц. Подложки располагались на изоляторе (3), или заземлялись, или на них подавалось смещение ±(0–100) В. Амплитуду тока определяли с использованием двух поясов Роговского, первый из которых был установлен на проводе, идущем к аноду, для измерения тока I_1, а второй – на проводе от подложки к заземлению для измерения тока I_2. Для повторяемости результатов использовали идентичные трансформаторы тока с одинаковым количеством витков (100), намотанных на ферритовом сердечнике, с обратным витком. По результатам пяти одинаковых измерений, расхождение в сигналах от этих двух приборов составило не более ±5%. Импульсы тока измеряли цифровым осциллографом 200 МГц. Для измерения скорости ионов плазмы за анодом использовались два проволочных зонда и два миниатюрных магнитных зонда с количеством 10 витками. Зонды были ориентированы перпендикулярно к оси разряда и располагались непосредственно за анодом (позиция 5) на расстоянии 50 мм друг от друга. Заряд подложки измеряли аналоговым пик-вольтметром U_s, настроенным на частоту импульсов генератора. Для откачки вакуумной камеры использовали последовательно роторный масляный насос и диффузионный паромасляный насос. Измерения давления в камере проводили универсальными вакуумными датчиками. Все эксперименты проводили при давлении в камере соответствующему низкому $p_1 = (4\text{-}6)\cdot10^{-2}$ мбар и высокому $p_2 = (2\text{–}4)\cdot10^{-4}$ мбар уровню вакуума. Далее понятия низкий вакуум и высокий (глубокий) вакуум будут относиться к этим двум значениям соответственно.

Результаты исследования

Работа установки при различном давлении

В экспериментах была исследована геометрия с аксиально-симметричной формой анода и катода без применения внешнего магнитного поля. Экспериментировали с алюминием, медью, титаном, железом. При использовании разных анодов было установлено, что длинные аноды с малым (55–100 мм) диаметром в форме трубки не дают плазме выйти из него, поэтому на подложках покрытия не осаждаются. В таких анодах напылению подвергается их внутренняя сторона. Более широкие (100–120 мм) аноды дают поток плазмы в сторону подложки, но это можно наблюдать только при глубоком вакууме. В целом картина выглядела следующим образом. При уровне вакуума до ~10^{-2} мбар наблюдали разные формы аномального тлеющего разряда, в рабочей камере на-

блюдалось свечение розоватого цвета, как показано на рисунке 2, а. Очевидно, это свечение соответствует спектру из остаточных газов в камере. При уровне вакуума ~(10^{-2}–10^{-3}) мбар разряд начинал заполнять пространство в промежутке между катодом и анодом. На выходе из анода наблюдали слабое свечение, интенсивность которого зависела от тока анода. При достижении предельного напряжения происходило замыкание анод-катод током постоянной дуги. Значение этого напряжения зависело от давления в камере и размеров анода, в пределах (400–500) В. На подложках, установленных напротив анода, осаждались тонкие слои пыли, либо на них ничего не наблюдали. При достижении $6 \cdot 10^{-4}$ мбар возникало яркое пятно у поверхности катода, между анодом и катодом наблюдали столб разряда цилиндрической формы (рисунок 2, в). За анодом наблюдали расходящийся конусообразный пучок от центра анода к подложке (рисунок 2, б). Цвет исходящего пучка зависит от материала катода: зеленый – на медном катоде, голубой – на титановом, белый – на алюминиевом и железном. На подложках, установленных напротив анода, осаждались сплошные покрытия из металла.



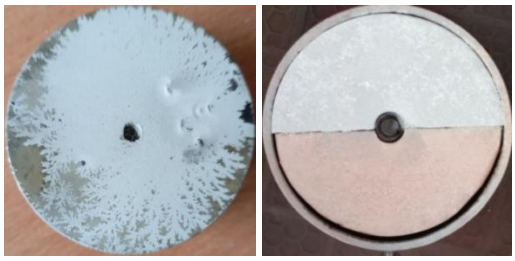
а) б)



в)

Рисунок 2. Тлеющий разряд на медном катоде (а), контрагированный разряд на титановом катоде (б), столб плазмы на медном катоде (в)

С целью выяснения особенностей существования разряда, исследована также эрозия поверхности катода из различных материалов, результаты представлены на рисунке 3. При низком вакууме наблюдали частичную эрозию как торцевой, так и боковой поверхности катодов. Рисунок на поверхности катода был характерным для эрозии первого типа [4] (узор в форме снежинок на рисунке 3, а). При глубоком вакууме наблюдали эрозию 2 типа (равномерное травление, на рисунке 3, б, в). Было использовано два способа поджига катода. При первом способе, керамическая трубка с высоковольтным электродом внутри вставлялась в сквозное отверстие в центре катода. Во втором случае электрод поджига прижимался к поверхности через керамическую трубку. По результатам опытов, при низком вакууме искровой пробой распространяется от центра поверхности к периферии. На поверхности образуется тонкий слой из осажденного материала катода. Мощность триггерного электрода такова, что при высоком вакууме искровой разряд переходит в дуговой. Это видно по кратерам на рисунке 3, а, где контрагировалась дуга. В дуговом режиме на поверхности катода наблюдается достаточно равномерная эрозия, а визуально наблюдается движение катодных пятен. При этом, из-за движения пятен по поверхности катода достигается равномерное расплавление поверхности (как видно из рисунка 3, б) на катодах из меди и алюминия. На катоде из сплава железа (рисунок 3, в) зона эрозии не превышала 30% от площади, расплавление наблюдалось в основном в центральной части. Катод из титана (рисунок 3, г) также слабо эродировал. В целом можно заметить, что центрально-осевое положение электрода дает более равномерную эрозию катодов.



а) б)



в) г)

Рисунок 3. Образцы катодов диаметром 50 мм, подвергнутых эрозии в течение 20 мин работы на установке при разном давлении. а) Al – 10^{-2} мбар, б) Al и Cu при 10^{-4} мбар, в) Fe-Co-Ni-V-W при 10^{-4} мбар. г) Ti при 10^{-4} мбар

Разрядный ток ускорителя и ВАХ

При низком вакууме самостоятельный пробой промежутка катод-анод начинался при напряжении U_a = 200 ± 50 В. При глубоком вакууме самостоятельный пробой не наблюдали вплоть до предела источника питания. При наличии высоковольтного триггера, напряжение зажигания разряда находилось в пределах 100±50 В, независимо от уровня вакуума в камере. Характерные колебания тока анода (1), тока подложки (2), а также импульс электрода поджига (3) показаны на рисунке 4, а и 4, б. Кривая падения напряжения на участке на анод – катод (4) и ток анода (1) показаны на рисунке 4, в. На рисунке 4, г показаны ток анода (1) и импульсы напряжения на зондах 5 и 6, установленных на участке анод-подложка на расстоянии 100 мм друг от друга. Сигналы с зондов снимали с подключенного к зонду разделительного конденсатора емкостью 2400 пФ.

Амплитуда импульса токов $I_{1,2}$ определялась по напряжению на выходе пояса Роговского и количеству витков:

$$I_{1,2} = \frac{U_{1,2}}{R} \cdot 100 ,$$

где R – нагрузка катушки, 3 Ом. Данные расчетов этих токов от напряжения на аноде U_a приведены на рисунке 5. Отметим, что амплитуда импульса тока гораздо выше минимального тока (50 А), необходимого для работы стационарной дуги, но его длительность мала (порядка 100 мкс). Как видно из рисунка 5, а, наблюдается слабо нелинейная зависимость максимальной амплитуды обоих токов от напряжения на аноде. При повышении напряжении на аноде от 100 до 300 В ток I_2 достигает половины I_1.Таким образом, ток с катода не весь уходит на анод, а его значительная часть идет в сторону подложки, формируя ионный поток.

По данным падения напряжения на участке анод – катод и разрядного тока построена ВАХ этого участка, которая показана на рисунке 5, б. Как видно, ВАХ падающая, что характерно для дугового разряда. Наконец, из рисунка 4, б видно, что максимум разрядного тока достигается, когда поджигающий импульс уже закончился (кривая 3 на рисунке 4, б).

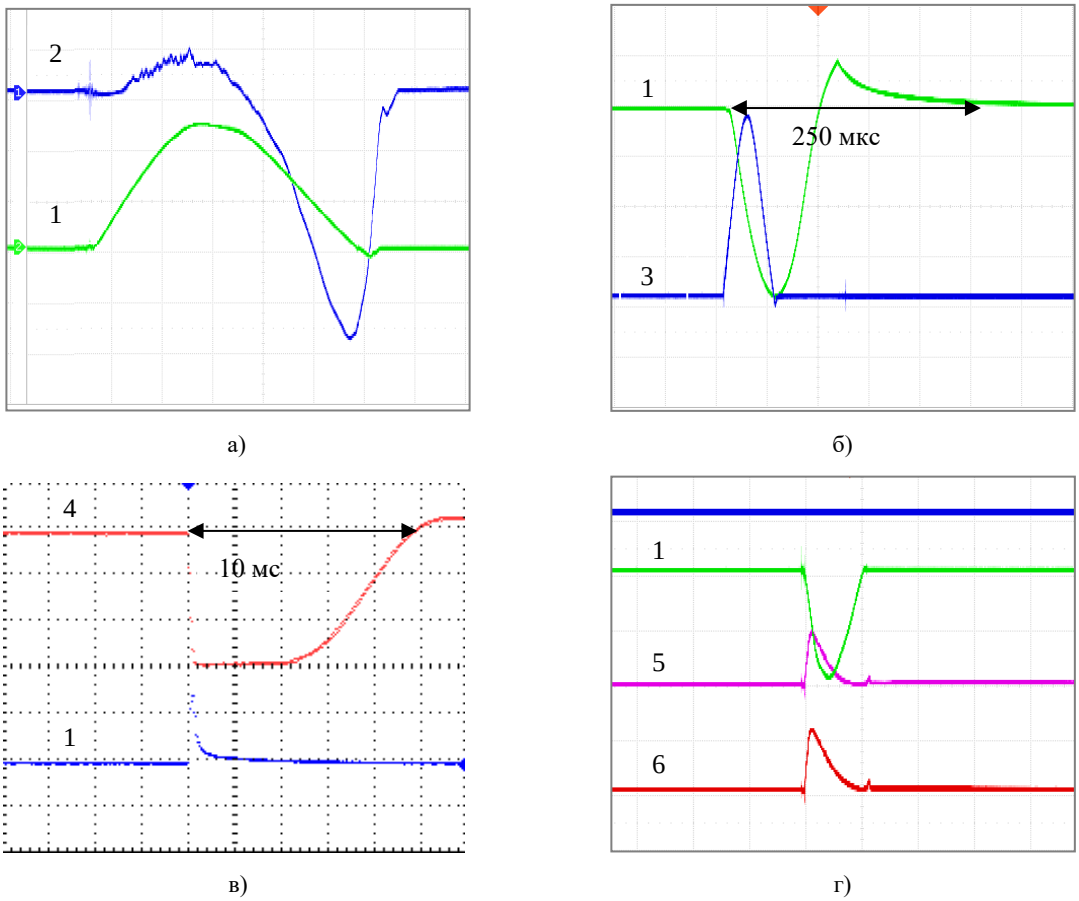
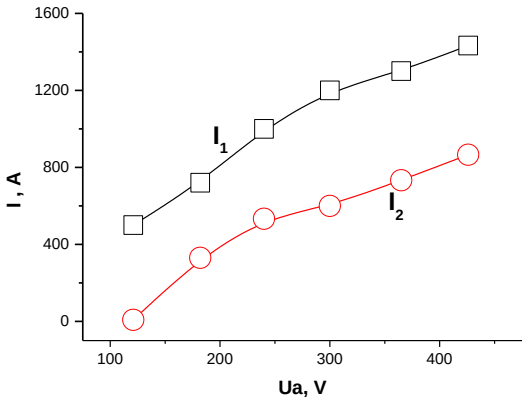
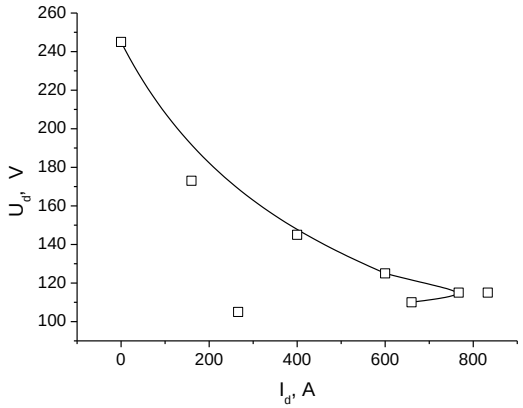


Рисунок 4. Ток анода (1) и ток подложки (2) (20 мкс/дел.) (а); ток анода (1) и импульс электрода поджига (3) (50 мкс/дел.) (б); ток анода (1) и падение напряжения на участке анод–катод (4) (300 В/дел., 2 мс/дел.) (в); ток анода (1) и сигналы от электрических зондов 5 и 6, расположенных в камере (20 мкс/дел.) (г)



а)



б)

Рисунок 5. Зависимость амплитуды компонентов тока в плазме от напряжения на аноде U_a (а) и ВАХ столба плазмы в первой четверти разрядного импульса (б)

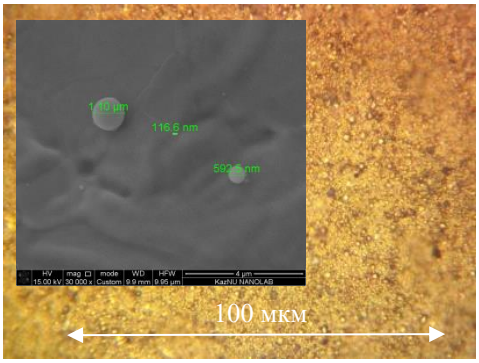
ОСАЖДЕНИЕ ПОКРЫТИЙ

На рисунке 6 приведены оптические фотографии толстых покрытий из меди на металлической подложке, осажденные при различном давлении 10^{-2} и 10^{-4} мбар. Как видно, при низком вакууме содержание микрочастиц значительное, средний размер частиц 0,1–1 мкм. При высоком вакууме 10^{-4} мбар покрытия осаждаются в виде сплошных слоев с неравномерной плотностью, размер частиц не превышает 0,4 мкм. Таким образом, морфология и структура осажденных на установке покрытий может регулироваться давлением в камере, а также осаждение капель металла. Однако детальное исследование свойств покрытий выходит за рамки данной публикации, здесь же фотоurафии покрытий приведены для демонстрации метода.

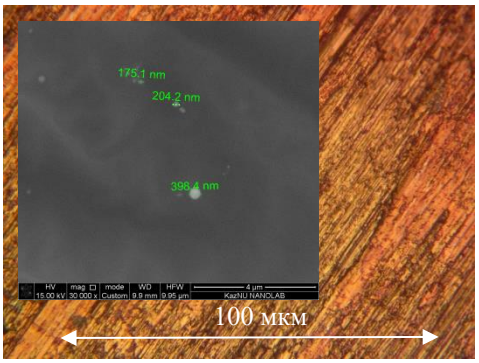
ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ УСТАНОВКИ

Максимальная амплитуда тока при высоком вакууме составила I_m = 1400 А, а его среднее значение зависит от частоты разряда. Значение $I_{ср}$ определяли по формуле:

$$I_{ср} = I_m \frac{\Delta t}{T},$$



а)



б)

Рисунок 6. Медное покрытие, осажденное на металлическую пластину при вакууме 10^{-2} мбар (а); то же при вакууме 10^{-4} мбар (б)

где I_m – амплитуда тока, Δt – длительность импульса разрядного тока, определяемая по осциллограмме (рисунок 4, в), T – период следования импульсов. Очевидно, что амплитуда импульса может расти с ростом напряжения, но его длительность слабо меняется, так как параметры разрядного контура остаются постоянными. Поэтому, для расчета возьмем максимальные значения длительности. Для выбора значений длительности импульса воспользуемся данными на рисунках 4, а и 4, в. На рисунке 4, а ток анода имеет максимальную длительность 250 мкс, а на рисунке 4, в длительность импульса напряжения 10 мс. В проведенных выше экспериментах частота следования импульсов была f = 5 Гц, период T = 200 мкс, тогда значение среднего тока составит:

$$I_{ср} = 1400 \frac{250\ \text{мкс}}{200\ \text{мс}} = 1{,}75\ \text{А}.$$

При оптимальном тепловом режиме на частоте f = 20 Гц, когда еще нет существенного нагрева трансформатора питания, T = 50 мкс, а значение $I_{ср}$ будет:

$$I_{ср} = 1400 \frac{250\ \text{мкс}}{50\ \text{мс}} = 7{,}00\ \text{А}.$$

Напряжение на разряде действует в течение 10 мс (рисунок 4, в) амплитудой 300 В. Для оптимального теплового режима работы с частотой 20 Гц:

$$U_{ср} = 300\frac{10\ \text{мс}}{50\ \text{мс}} = 60\ \text{В}.$$

При расчете средней мощности потребления $P_{ср} = I_{ср}\cdot U_{ср}$ получим значения 105 Вт и 420 Вт для 5 Гц и 20 Гц, соответственно. Таким образом, оценочные расчеты свидетельствуют о высокой энергоэффективности ускорителя, так как стационарные дуговые установки потребляют десятки и сотни киловатт энергии.

Оценим характеристики мощности установки по другому принципу, предложенному в публикации [15], посвященной исследованию аналогичной установки импульсной дуги. При работе с частотой f средний ток заряда накопителя будет равен среднему току, протекающему через электрод, который в свою очередь равен величине разряда конденсаторной батареи ΔQ в единичном акте, умноженному на f:

$$I_{ср} = \Delta Q\cdot f = (U_н - U_к)\cdot C\cdot f,$$

где $U_н$ – начальное напряжение на конденсаторной батарее; $U_к$ – конечное напряжение на конденсаторной батарее, примерно равное напряжению гашения дуги; C – емкость конденсаторной батареи. Средняя потребляемая мощность источника питания разряда будет равна:

$$P = (U_н^2 - U_к^2)\cdot C\cdot f/2.$$

Согласно рисунку 4, в, $U_н$ = 300 В, в то время как $U_к$ = 0 В, так как в нашей установке дуга между импульсами полностью гаснет. При емкости в 400 мкФ и частоте 20 Гц по этой формуле получаем:

$$P = (300)^2\cdot 400\cdot 10^{-6}\cdot 20/2 = 360\ \text{Вт},$$

что близко к полученному выше значению 420 Вт.

Наконец, сравним данные с работой [15], где на импульсной дуговой установке с емкостью 10 мФ при напряжении 50 В получен средний ток 24 А на частоте 50 Гц, т.е. средняя мощность составит 1200 Вт. На нашей установке, при максимальной емкости конденсатора 1200 мкФ (максимальное количество конденсаторов в эксперименте было 12), при 50 Гц, для среднего тока получим значение 18 А, средняя потребляемая мощность составит 1080 Вт. Таким образом, сравнимую с установкой [15] мощность наша установка потребляет при емкости 1,2 мФ, что ниже на порядок.

Обсуждение

Итак, в импульсном режиме возможна работа установки при разном уровне вакуума от 10^{-1} до 10^{-4} мбар, но характер разряда меняется при понижении давления от искрового к дуговому. Некоторые наблюдаемые явления в работе установки характерны для вакуумных дуговых разрядов. Во-первых, это яркие катодные пятна, которые перемещаются по поверхности катода, создавая равномерную эрозию. Как показали эксперименты с катодами, материалы с высокой атомной массой (медь и железо) также хорошо эродируют, как и материалы с легкой массой, такие как алюминий и титан. Все они способны эродировать в высоком вакууме, но степень эрозии зависит также от температуры плавления катода. Оценить этот эффект на большом количестве материалов нам не удалось, но по факту, площадь эрозии титанового катода меньше, чем алюминиевого, при одинаковых условиях эксперимента. Данные по степени эрозии материалов в дуговом разряде (коэффициента выхода массы мкг/Кл) описаны в литературе достаточно подробно [4, 15]. Во-вторых, иногда наблюдались яркие искры от катода и от подложки, связанные с оторванными микрочастицами, а также распыление подложки как второго катода. В-третьих, потоком плазмы можно управлять магнитным полем, как показано на рисунке 3, с, где плазма находится внутри спирального соленоида. Но на этом визуальное сходство с дуговым разрядом заканчивается.

Детальное исследование характеристик тока анода, тока подложки и напряжения с зондов показало, что происходящие в установке процессы сложны и взаимосвязаны. Анодный ток представляет собой импульс 1400 А с узким максимумом. На токе подложки наблюдается два пика: амплитуда пологого положительного пика (сигнал 2 на рисунке 4, а) не зависит от напряжения, в максимуме 90 А, а острого отрицательного пика – пропорционально напряжению анода, в максимуме 700 А. Кроме этого, из графика 5, а видно, что ток с катода не весь уходит на анод, а его значительная часть идет в сторону подложки. Таким образом, второй пик на кривой 2 на рисунке 4, а мы связываем с ионным током на подложку. По полученным данным отметим, что работа установки имеет особенности, характерные как для дуговых, так и для импульсных плазменных ускорителей. Прежде всего – это осциллограмма тока анода, на которой нет характерной для дуги плато. Однако, из-за относительно большой длительности импульса 110 мкс, катодные пятна на ее поверхности успевают формироваться, что приводит к генерации металлической плазмы. Дальнейшее ускорение плазмы обеспечивается собственным магнитным полем тока, как и в плазменных ускорителях. На рисунке 4, а видно, что пик тока с подложки идет через 50 мкс после максимума разрядного тока на аноде. По этим данным можем оценить скорость потока ионов на подложку $\upsilon = L / t$, где L – расстояние анод – подложка, равное 150 мм. Для времени распространения сигнала в 50 мкс и скорости потока получим 0,3 см/мкс ($3\cdot 10^3$ м/с).

Из рисунка 4, г видно, что установка генерирует высокоскоростной поток, который появляется на зондах 5 (рисунок 1) одновременно с началом разрядного тока (кривые 5 и 6 на рисунке 4, г, полученные для титанового катода). При расстоянии между зондами 10 см, если принять время прохождения за 2 мкс (цена малого деления на экране осциллографа), скорость этого потока явно выше 5 см/мкс ($5\cdot 10^4$ м/с). Появление пучков ускоренных ионов материала катода наблюдали ранее авторы [14] и др.,

где были получены значения скорости ($2{,}22\cdot10^4$ м/с и $2{,}76\cdot10^4$ м/с) для ионов титана и алюминия соответственно. Как видно, оцененная нами скорость, по крайней мере, в несколько раз выше. По-видимому, их появление связано с начальным искровым разрядом, но при выключенном напряжении анода они не фиксируются. Авторы склоняются к мнению, что происходит выброс этих частиц в сторону подложки при их ускорении в электрическом импульсе поджигающего электрода (кривая 3 на рисунке 4, б). Изменение параметров разряда в экспериментах, таких как напряжение на аноде, емкость конденсаторов анода, не приводило к изменениям формы импульсов 5 и 6 на рисунке 4, г, а также их временной разницы. Однако при низком вакууме их также не наблюдали. Данный феномен требует дальнейших исследований с применением специальных методов наносекундной синхронизации.

После сжатия в собственном магнитном поле, столб плазмы распространяется вниз к аноду, и, по нашему предположению, потоки электронов и ионов начинают разделяться на два направления. На схеме на рисунке 1 ток электронов показан пунктирной стрелкой, а ток ионов – штриховой стрелкой. Вначале, электронный ток устремляется к аноду. На срезе анода, под действием радиальной компоненты электрического поля, электроны дрейфуют к аноду, столб плазмы начинает расширяться. Дальнейшее движение ионов происходит действием электрического поля объемного заряда электронов, далее они проходят анод, дрейфуют к подложке, и создают там положительный потенциал. В экспериментах замечено, что изолированная от камеры подложка заряжается до +60 В, величина которого измерена пик-вольтметром (прибор U_s на рисунке 1). При подаче отрицательного смещения на подложку, появляются микродуги на его поверхности, в результате вторичной ион-электронной эмиссии. При повышении напряжения на аноде наблюдается сильная эрозия подложки, так как ионы ускоряются быстрее.

Выводы

В целом разработанная установка является неким гибридом между импульсным плазменным ускорителем, в частности импульсным ускорителем газовой плазмы, и дуговым ионным источником. При низком уровне вакуума дуга на катоде не формируется, газовая плазма носит форму аномального тлеющего разряда, а тока недостаточно для выброса плазмы за пределы анода. С повышением уровня вакуума усиленная эрозия катода способствует появлению дуговой плазмы. Сильный ток дуги сжимает плазму к оси, и за счет собственного магнитного поля плазма вытесняется из анода. Несмотря на большой импульс тока до (1400 А), его длительность (100 мкс) достаточно коротка для формирования устойчивой дуги на катоде и появления плато на кривой тока. Тем не менее, этого времени достаточно для генерации металлической плазмы в импульсе. Таким образом, задача по разработке источника металлической плазмы решена.

В этом исследовании мы также обнаружили поток высокоскоростных частиц из плазмы дуги, который наблюдался рядом авторов ранее. Скорость этих частиц более $5\cdot10^4$ м/с, что гораздо выше скорости основного потока плазмы $3\cdot10^3$ м/с, и никак не зависит параметров разряда. Для выяснения механизма их образования пока недостаточно данных. По нашим наблюдениям, они формируются в результате действия импульса поджигающего электрода. Как отмечалось во введении, выяснению природы этих частиц посвящено довольно много работ и обсуждение идет до сих пор.

Установка, разработанная в данной работе, отличается простотой конструкции и эффективностью. Технологическая особенность применения установки в том, что при низкой потребляемой мощности не более 1 кВт, она способна генерировать поток чистой металлической плазмы. При давлении менее чем 10^{-4} мбар и при импульсных токах разряда порядка 1400 А, ионный ток на подложку составляет 600 А. Это очень много для обычной дуговой установки, и необходимы дополнительные измерения, например, цилиндрами Фарадея. При расширении в пространстве анода металлическая плазма подвергается ряду термодинамических и электрических процессов, в результате которых в плазме могут сформироваться наночастицы металла, как показано в [10–12]. Режим с расширением плазмы в вакуум интересен тем, что осаждаемые из плазмы слои из наночастиц могут быть использованы для создания новых приборов энергетики, таких как пористые электроды, поглотители газа и др. Несомненно, это довольно обширная тема для дальнейших исследований.

Данные исследования проводятся в рамках проекта МОН РК №AP19676182.

Литература / References

1. Pelletier J., Anders A. Plasma-based ion implantation and deposition: A review of Physics, Technology, and Application. //IEEE Transactions on Plasma Science. – 2005. – Vol. 33. – No. 6. – P. 1944–1959.
2. Jüttner B. Cathode spots of electric arcs // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2001. – Vol. 34. – P. 103.
3. Aksenov I.I., Aksyonov D.S. Physical aspects of vacuum-arc coating deposition // East Eur. J. Phys. – 2014. – Vol. 1. – No. 3. – P. 22–39.
4. Anders A. Cathodic arc. From Fractal Spots to Energetic Condensation. Springer Science /Business Media LLC. – 2008. https://doi.org/10.1007/978-0-387-79108-1
5. Rysanek F, Burton R. L., Keidar M. Macroparticle Charging in a Pulsed Vacuum Arc Thruster Discharge.//42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 9-12 July 2006, Sacramento, California. Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., AIAA 2006-4499.
6. I. Beilis. Cathode Spot Jets. Velocity and Ion Current // Plasma and Spot Phenomena in Electrical Arcs. Springer

Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics (SSAOPP) – 2020. – Vol. 113. – P. 347-420. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44747-2
7. M. Song, Q. Zhou, W. Yang, Q. Sun, Y. Dong, H.Zhang, Z.Wang, Particle simulation on the ion acceleration in vacuum arc discharge // Plasma Sources Science and Technology. – 2023. – Vol. 32. – No. 9, (095002). https://doi.org/10.1088/1361-6595/aceeaf
8. A.V. Kozyrev, V. Yu. Kozhevnikov, N. S. Semeniuk, A.O. Kokovin, Initial kinetics of electrons, ions and electric field in planar vacuum diode with plasma cathode // Plasma Sources Science and Technology. – 2023. – 32, 10, (105010). https://doi.org/10.1088/1361-6595/acfff1
9. P.E. Belensov. Comments on the article “Collective acceleration of ions in systems with a virtual cathode” // Uspekhi Physics. – 2004. – Vol. 174. – No. 2.
10. Khoroshyh V.M. Kapelnaya phasa cathodnoy erosiy v stationarnoy vacuumnoy duge. Physicheskaya engineeria poverchnosty. – 2005. – Vol. 2, No. 4. – P. 200–213 (In Russ.).
11. Wegner K.et al., Design of metal nanoparticles synthesis by vapor flow condensation // Chem. Eng. Science. – 2002. – Vol. 57. – Issue. 10. – P. 1753–1762.
12. Miyazawa, K., Yoshitake, M., & Tanaka, Y. HRTEM analyses of the platinum nanoparticles prepared on graphite particles using coaxial arc plasma deposition // Journal of Nanoparticle Research. – 2017. – Vol. 19(6). doi:10.1007/s11051-017-3895-6
13. Baimbetov F. B, Zhukeshov A. M. and Amrenova A. U.. Dynamics of Plasma Flow Formation in a Pulsed Accelerator Operating at a Constant Pressure // Technical Physics Letters. – 2007/ – Vol. 33. – No. 1. – P. 77–79.
14. Mesyats G.A., Barengol'ts S.A. Mechanism of anomalous ion generation in vacuum arcs // Physics-Uspekhi. – 2002. – Vol. 45. – No. 10. – P. 1001–1018. https://doi.org/10.1070/PU2002v045n10ABEH001247
15. Вершок Б.А., Дормашев А.Б., Маргулев И.Я. и др. Получение нанопорошка вакуумным импульсно-дуговым методом // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. – 2006. – Вып. 2. – С. 31–40. [Vershok B.A., Dormashev A.B., Margulev I.Ya. i dr. Poluchenie nanoporoshka vakuumnym impul'sno-dugovym metodom // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Termoyadernyy sintez. – 2006. – Issue 2. – P. 31–40.] (In Russ.)

ИМПУЛЬСТІ ДОҒАЛЫҚ ПЛАЗМАЛЫҚ ҮДЕТКІШТІҢ ВАКУУМДАҒЫ ЖҰМЫС ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

Ә. У. Әміренова, Ә. М. Жүкешов*, Ұ. Б. Абдыбай, Ж. М. Молдабеков

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

** Байланыс үшін E-mail: zhukeshov@physics.kz*

Металл плазма ағынын алу үшін вакуумдық доғаның импульстік үдеткіші жасалды және оның камерадағы вакуум деңгейінің өзгеруі кезіндегі жұмысы зерттелді. Аксиалдық симметриялық электродтарды қолданған кезде алдымен катодтағы солғын разряд, содан кейін доғалық разрядтың пайда болуы және плазманың анодтық потенциалмен одан әрі үдеуі көрсетілген. Вакуумның 10^{-4} мбар жоғары деңгейінде плазманың жүйенің осіне қарай ығысуы және плазманың өзінің магнит өрісінде қысылуы байқалды. Сондай-ақ жоғары жылдамдықты ағын генерациясы қондырғының жұмысына ілесе жүреді, оның жылдамдығы негізгі ағынның жылдамдығынан біршама жоғары. Плазманы генерациялау механизмі мен оны үдету ерекшеліктері, сондай-ақ вакуумның әртүрлі деңгейінде қондырғыда жабын алу шарттары талқыланады. Осы жұмыста жасалған қондырғы конструкциясының қарапайымдылығымен және тиімділігімен ерекшеленеді.

Түйін сөздер: *плазма, үдеткіш, вакуумдық доға, импульстік разряд, плазма диагностикасы, жабын.*

OPERATING FEATURES OF A PULSE ARC PLASMA ACCELERATOR IN VACUUM

A. U. Amrenova, A. M. Zhukeshov*, U. B. Abdybay, Zh. M. Moldabekov

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

** E-mail for contact: zhukeshov@physics.kz*

The vacuum pulse arc plasma accelerator was designed especially for obtaining metal plasma streams also its performance under vacuum level variation in chamber was accurately explored. By using axial symmetric electrodes, the formation of firstly glow discharge after arc discharge has shown at the cathode and subsequent plasma acceleration with anodic potential. With a high vacuum level rate that equaled to 10^{-4} mbars, the plasma compression to the system axis and plasma electromagnetic pinch was clearly observed. Also presented installation accompanying the high-velocity stream generation process, that goes above the observed normal speed of the main stream. This work contains the discussion of plasma generation mechanisms and its features of acceleration, and conditions for receiving coverings at the unit under various vacuum levels. Designed unit presented on this work is characterized by its structure simplicity and almost effectiveness.

Keywords: *plasma, accelerator, vacuum arc, impulsive discharge, plasma diagnostics, coverings.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-91-104
УДК 621.793.71

ВЛИЯНИЕ ВАРЬИРОВАНИЯ РАССТОЯНИЯ НАПЫЛЕНИЯ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И МЕХАНО-ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ 86WC-10Co-4Cr, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ HVOF

Б. К. Рахадилов[1], Н. Муктанова[2,3*], Д. Н. Какимжанов[2,3]

[1] Восточно-Казахстанский университет им. Сарсена Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан
[2] Восточно-Казахстанский технический университет им. Даулета Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан
[3] ТОО "PlasmaScience", Усть-Каменогорск, Казахстан

** E-mail для контактов: ntuktanova@bk.ru*

В работе приводятся результаты металлографического и трибологического исследования покрытий 86WC-10Co-4Cr, полученных методом HVOF на установке Termika-3 при варьировании расстояния напыления. Изучается влияние расстояния напыления на микроструктуру покрытия, фазовый состав, а также механические и трибологические свойства. Фазовый состав, микроструктура и распределение элементов анализировались с применением методов рентгеновской дифракции (РФА), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС). Твердость образцов измерялась на микротвердомере по методу Виккерса, коэффициент трения и степень износа исследовались с использованием измерителя трения и износа. Согласно результатам исследования, установлено, что оптимальным расстоянием напыления для нанесения покрытий 86WC-10Co-4Cr с улушенными характеристиками износостойкости и твердости, а также с низкой пористостью, является 300 мм.

Ключевые слова: *износостойкость, металлокермическое покрытие, микроструктура, фазовый состав, высокоскоростное кислородно-топливное напыление, коэффициент трения.*

Введение

Одной из главных технических задач транспортировки нефти и нефтепродуктов является создание высокоорганизованной системы коммуникаций трубопроводного транспорта, обеспечивающего высокую надежность и полную экологическую безопасность. Это можно обеспечить созданием и изготовлением качественной трубопроводной арматуры и других элементов системы трубопроводного транспорта применением высокопрочных и износостойких материалов.

В Республике Казахстан производством трубопроводной арматуры занимаются крупные заводы, такие как: акционерное общество «Усть-Каменогорский арматурный завод» (город Усть-Каменогорск), товарищество с ограниченной ответственностью «Завод Казахстанская Арматура» (город Темиртау), акционерное общество «Усть-Каменогорский завод промышленной арматуры» (город Усть-Каменогорск), товарищество с ограниченной ответственностью «Павлодарский завод трубопроводной арматуры» (город Павлодар), Атырауский завод трубопроводной арматуры (город Атырау). Потребителями выпускаемой в Республике Казахстан трубопроводной арматуры, в том числе задвижек (шиберные, клиновые и затворы обратные), являются крупнейшие энергодобывающие, нефтеперерабатывающие и металлургические предприятия Казахстана и Содружества Независимых Государств [1].

Одной из технических задач вышеуказанных заводов является повышение надежности и долговечности шиберных задвижек. Задвижки являются одним из важных элементов в транспортировке нефти и газа, в процессе добычи от скважины и по сложной сети трубопроводов, определяя условия безопасной эксплуатации и защиты окружающей среды.

Интенсификация производства и повышение конкурентоспособности отечественных изделий требует применения современных материалов, обладающих улучшенными физико-химическими свойствами. Однако, отечественные заводы по производству трубопроводной арматуры, а именно шиберных задвижек, все еще применяют традиционные и устаревшие технологии наплавки и нанесение покрытий, которые не обеспечивают высокие трибологические и коррозионные характеристики узла затвор-седло.

Например, Усть-Каменогорский арматурный завод применяет технологию электродуговой наплавки дисперсионно-твердеющей сталью типа 10Х17Н87С5Г2Т уплотнительных поверхностей деталей затвора тяжелой сварной нефтяной трубопроводной арматуры. Однако, данный метод не обеспечивает высоких механических и трибологических характеристик поверхности. Поэтому, в условиях Усть-Каменогорского арматурного завода для повышения износостойкости наплавленного материала из 10Х17Н8С5Г2Т применяется ультразвуковая упрочняющая финишная обработка, которая позволяет одновременно повысить поверхностную твердость наплавленного металла, класс шероховатости поверхностей и создать антифрикционный поверхностный слой. Тем не менее, и данная комбинированная технология не обеспечивает срок службы шиберных задвижек на уровне импортных и является экономически нецелесообразной. Поэтому данный завод в настоящее время широко применяет для повышения

срока службы шиберных задвижек технологию гальванического хромирования, которая является экологический вредной. В развитых странах сегодня существуют жесткие ограничения на процессы с эмиссией шестивалентного хрома [2].

А другие заводы Казахстана все еще не освоили и не внедрили технологии наплавки или напыления при производстве деталей шиберных задвижек. Например, АО «Усть-Каменогорский завод промышленной арматуры» производит малогабаритные шиберные задвижки без применения поверхностной обработки (наплавка или напыление), что делает их менее конкурентоспособными по сравнению с импортными продукциями [3]. Таким образом, для повышения конкурентоспособности отечественных задвижек, используемых в нефтедобывающей промышленности, и для обеспечения импортозамещения, на наш взгляд, необходимо разработать и внедрить современные газотермические технологии нанесения защитных покрытий. Кроме того, необходимо заменить технологию гальванического хромирования на газотермические технологии. В промышленно развитых странах освоение техники газотермического напыления происходит путем вытеснения «грязных» гальванических технологий.

Как известно из работ С.С. Полоскова [4], С.А. Тукова, М.В. Корчагина и С.О. Киреева [5], в процессе эксплуатации компоненты арматуры, используемой в нефтяной промышленности, подвергаются интенсивному эрозионному и коррозионному износу, что приводит к резкому снижению их долговечности. Эрозия и коррозия задвижек, используемых в нефтедобывающей промышленности, является серьезной проблемой. Это связано с тем, что взвешенные частицы песка в потоке нефти и газа вызывают эрозию некоторых критических компонентов, таких как задвижки и седловые кольца, что приводит к значительным эксплуатационным расходам. С другой стороны, коррозия этих компонентов из-за хлоридов, сульфидов и других примесей в сырой нефти и газе также может привести к утечкам и преждевременным отказам. Чтобы противостоять сочетанию трения и износа, на затворах и седлах используются различные покрытия и способы обработки поверхности. Они включают твердое хромирование, электролитическое никелирование, конверсионные покрытия, диффузионную обработку, термическое напыление покрытий и наплавку сварных швов. Среди них термическое напыление является одним из наиболее эффективным методом с точки зрения мировой практики и современным анологом вышеизложенных методов [6].

Согласно источникам [7–9] установлено, что с помощью различных методов термического напыления, таких как воздушно-плазменное напыление (APS), вакуумное плазменное напыление (VPS), детонационный пистолет, дуговое напыление, пламенное напыление и высокоскоростное кислородно-топливное (газопламенное) напыление (HVOF) наносятся в основном покрытия на основе керамико-металлического композита (керметы), в частности карбид-вольфрам-кобальт WC-Co, карбид-вольфрам-кобальт-хром WC-Co-Cr, а также хром-карбид-никель-хром Cr_3C_2-NiCr [10–13].

Преимуществом этих материалов является их высокая стойкость к абразивному, эрозионному и кавитационному износу, а керамические покрытия, полученные из них, характеризуются, без ограничений, повышенной твердостью, низким коэффициентом теплопроводности, высокой коррозионной и окислительной стойкостью и высокой стойкостью к абразивному износу и эрозии [14–16].

Карбидо-кобальтовые (WC-Co) композиты хорошо зарекомендовали себя как износо- и эрозионностойкие покрытия во многих отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая и морская (шасси самолетов, пропеллеры, газовые турбины, гидравлические приводы), бурение нефтяных и газовых скважин, резка металла, горнодобывающая промышленность, обработка металлов давлением, целлюлозно-бумажная промышленность, геотермальная энергетика, производство электроэнергии (газовые турбины) и морские сооружения [17–24].

В качестве улучшения традиционного WC-Co порошка, WC-Co-Cr порошок становится все более используемым в промышленности из-за превосходной износостойкости и устойчивости к коррозии этого состава [16, 22, 25]. Cr выступает в качестве самого основного элемента сопротивления коррозию [26, 27]. Более высокие характеристики износа объясняются тем, что матрица CoCr обеспечивает лучшее связывание с карбидами и, следовательно, препятствует потере карбидов на границах частиц распыления во время износа [28].

Покрытия WC-Co-Cr могут быть нанесены с помощью различных методов распыления, таких как воздушно-плазменное распыление (APS), вакуумное плазменное распыление (VPS), детонационный пистолет, дуговое распыление, пламенное распыление и высокоскоростное кислородное распыление (HVOF) [29-31]. Однако процесс HVOF получил признание за свои преимущества, включая меньшую пористость, уменьшение реакций разложения, более высокую степень сохранения карбида вольфрама (WC), и лучшую адгезию между карбидом вольфрама (WC) и металлической связующей фазой [32-38].

В работе [39] были проведены сравнительные исследования покрытий WC-10Co-4Cr и WC-Co, напыленные методом HVOF, по производительности в условиях сухого абразивного износа при комнатной температуре при нагрузке 10 Н. WC-Co-Cr изнашивался в 20 раз меньше по объему снятого материала по сравнению с WC-Co, в зависимости от количества циклов износа. Покрытие WC-Co-Cr имеет свои износостойкие свойства благодаря высокой объемной доле твердых и прочных зерен WC в металлической

связующей фазе на основе Co. Наличие металлического связующего обеспечивает определенную степень прочности покрытия по сравнению с чистой керамической плиткой, однако связующее переходит в хрупкое состояние, если во время напыления в нем растворяется большое количество W и C [40]. Производительность покрытий на основе WC также сильно зависит от состава и структуры исходных порошков. Недавние исследования показали, что износостойкость и коррозионные характеристики твердосплавных (керметных) покрытий HVOF могут быть улучшены, если размер карбидных частиц уменьшен до субмикронных или нано-масштабов [41–44]. В работах были указаны, что разложение и обезуглероживание частиц карбида ответственно за фазовые превращения и влияет на свойства покрытия на основе WC-Co.

Таким образом, тщательная оптимизация параметров распыления и выбор порошкового сырья необходимы для обеспечения достаточной скорости частиц для получения жизнеспособного покрытия, одновременно предотвращая перегрев частиц для предотвращения обезуглероживания.

Покрытия WC-Co-Cr были выбраны в качестве хорошего потенциального материала для этого применения, так как этот материал демонстрирует износостойкость, сравнимую с широко используемым WC-Co, но также предлагает улучшение коррозионной стойкости.

Кроме того, покрытия, выбираемые для затворов и седел, должны отвечать строгим эксплуатационным требованиям и обеспечивать надежное газонепроницаемое уплотнение металл-металл. Как показал анализ литературы, процесс нанесения покрытий с использованием высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF) улучшает свойства поверхности, повышая износостойкость и коррозионную стойкость, а также обеспечивают эффективное уплотнение между функциональными поверхностями. Однако, недостаточно изучены закономерности формирования структурно-фазовых состояний HVOF-покрытий WC-Co-Cr и их влияния на трибологические свойства. Поэтому требуется провести комплексные экспериментальные исследования структурно-фазового состояния покрытий на основе карбида вольфрама в зависимости от технологического режима напыления.

Таким образом, целью настоящей статьи является исследование структурно-фазового состояния и механо-трибологических свойств покрытий на основе 86WC-10Co-4Cr, полученных методом HVOF.

Все исследовательские работы авторов, связанные с технологией HVOF, были выполнены на базе ТОО «PlasmaScience» (Республика Казахстан, город Усть-Каменогорск) [45].

Материалы и методы

В настоящей работе для обеспечения улучшения трибологических свойств узла «затвор-седло» клапана трубопроводной арматуры использовался спеченный, металлокерамический порошок карбида вольфрама в кобальт-хромовой матрице 86WC-10Co-4Cr (АО «Полема», г. Тула, Россия) с размером частиц 15÷50 мкм. В качестве подложки были использованы образцы из высоколегированной, коррозионностойкой стали 30Х13 толщиной 4 мм (используется в конструкции узла затвора). Химический состав подложки и материалов покрытий 86WC-10Co-4Cr представлен в таблице 1.

В качестве изменяемого параметра выступали дистанция напыления: L1 – 100 мм, L2 – 200 мм, L3 – 300 мм. Перед напылением поверхность подложки была обезжирена и подвергнута пескоструйной обработке под давлением 0,6 МПа с использованием электрокорунда. Для нанесения покрытия использовалась установка высокоскоростного кислородно-топливного напыления HVOF Termika-3 (производство ООО «Плазмацентр», г. Санкт-Петербург) [46].

На рисунке 1 представлена схема установки системы HVOF Termika-3. Пропан (C_3H_8) и кислород (O) в баллонах, которые являются горючими газами, использовались в качестве топлива. С пультом управления газами устанавливается давление этих газов. При высоком давлении эти газы смешиваются друг с другом в камере, после чего порошки подаются в горелку с помощью транспортирующего газа (сжатый воздух от компрессора) из порошкового дозатора. На выходе из горелки, порошки попадают в пламя, где происходит их расплавление до пластического состояния. Затем расплавленные порошки направляются на предварительно подготовленную поверхность (подложка) образуя покрытие.

Таблица 1. Химический состав материала основы и покрытий (мас. %)

Материал подложки (сталь 30Х13)												
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Ti	Cu	W	Fe
0,26–0,35	<0,8	<0,8	<0,03	<0,025	12–14	<0,3	<0,6	<0,2	<0,2	<0,3	<0,2	остальное
Покрытие 86WC-10Co-4Cr												
C	Co	Cr	Fe	W	другие							
5,34	9,86	4,03	0,08	основа	< 0,3							

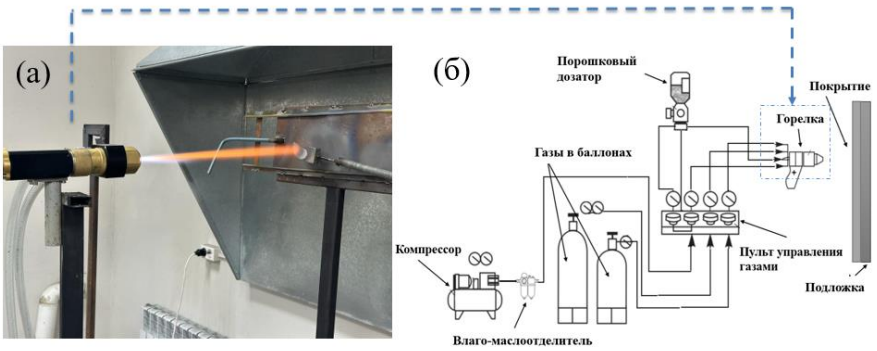


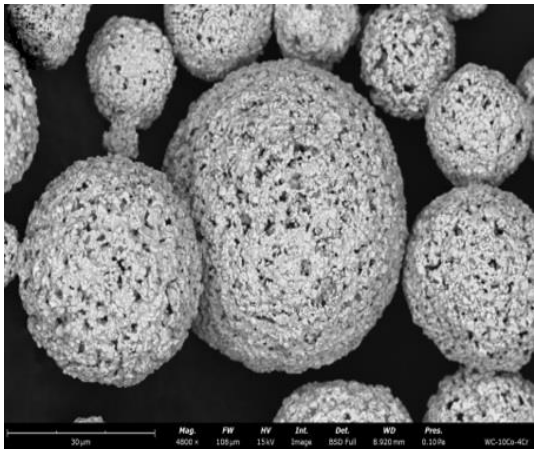
Рисунок 1. Процесс напыления образцов методом HVOF Termika-3 (а) и схематическое изображение метода HVOF Termika-3 (б)

На установке HVOF Termika-3 были получены металлокерамические покрытия 86WC-10Co-4Cr с варьированием расстояния напыления: L1 – 100 мм, L2 – 200 мм, L3 – 300 мм. Время выдержки всех образцов при напылении составляло 15 с. Параметры, установленные для высокоскоростного кислородно-топливного напыления HVOF Termika-3, были определены путем проведения серии экспериментов и приведены в таблице 2.

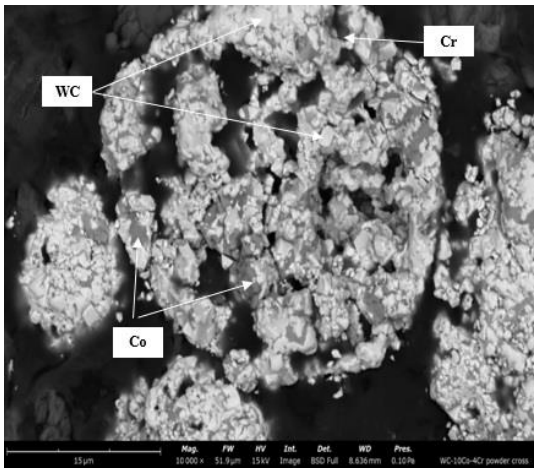
Таблица 2. Режимы напыления 86WC-10Co-4Cr - покрытий

Пример кода	**L1**	**L2**	**L3**
Расстояние напыления, мм	**100**	**200**	**300**
Режимы параметров на пульте управления газами	**оптимальные значения**		
– давление пропана	2,9 бар		
– давление кислорода	5 бар		
– давление сжатого воздуха	3,2 бар		

Структурные исследования и измерения пористости и микротвердости покрытий проводились на поперечных микрошлифах. Морфология порошка и поперечного сечения покрытий была охарактеризована с помощью сканирующей электронной микроскопии TESCAN MIRA3 LMH (TESCAN, г. Брно, Чешская Республика) с приставкой энергодисперсионного анализа INCA ENERGY (“Oxford Instruments”, Великобритания). Пористость покрытий оценивалась по СЭМ изображениям с использованием программного обеспечения для анализа изображений Altami Studio 4.0 оптического микроскопа Altami MET 5S (ООО «Альтами», г. Санкт-Петербург, Россия). СЭМ-наблюдение исходных порошков показывают, что порошки имеют сферическую форму (рисунок 2, а). Это важно с технологической точки зрения, поскольку обеспечивает подходящую сыпучесть частиц порошка во время напыления. Согласно, анализу СЭМ изображения поперечного сечения порошка (рисунок 2, б), установлено, что морфологически структура состоит из двух фаз с разным цветом, где, полигональные частицы WC имеют светлый окрас, а металлическая фаза кобальт-хрома (матрица) представлена в темно-сером цвете. Частицы карбида вольфрама хорошо распределены и внедрены в кобальт-хромовую матрицу, что согласуется со многими исследованиями, представленными в [48, 49]. Также можно заметить, что присутствуют поры, которые могут облегчить распределение тепла и способствовать лучшему плавлению или полуплавлению частиц.



а)



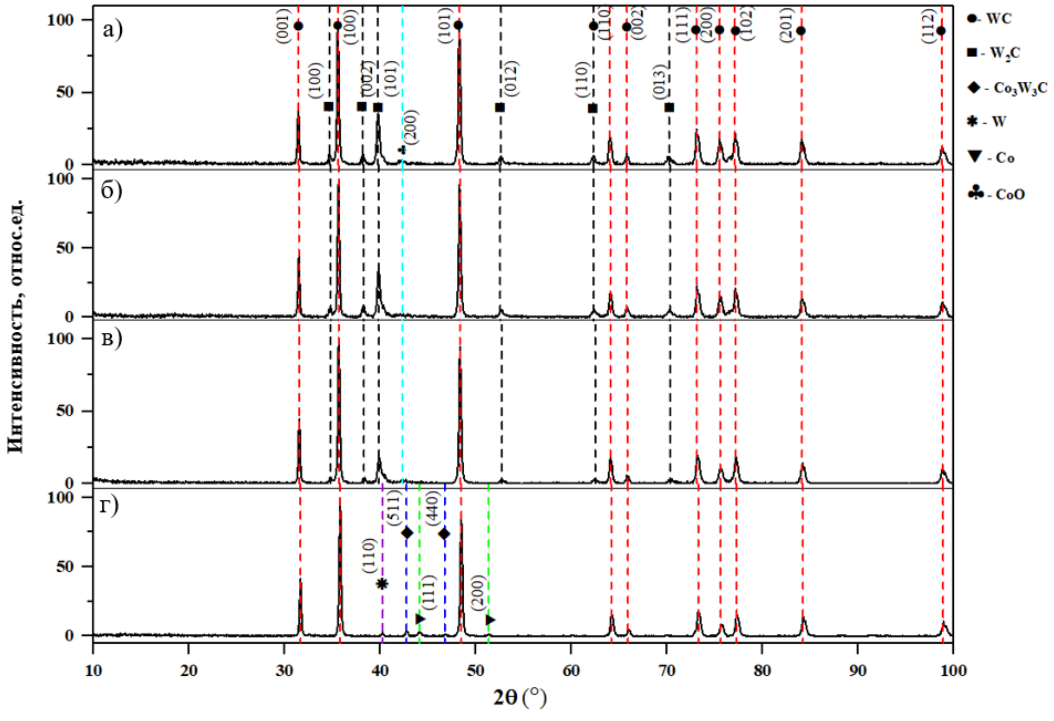
б)

Рисунок 2. Агломерированный и спеченный порошок WC–10Co-4Cr: морфология исходного порошка (а) и поперечное сечение порошкового агломерата (б)

Рентгеноструктурный анализ (РСА) порошков и покрытий проводился на дифрактометре X'PertPRO ("Philips Corporation", г. Амстердам, Нидерланды) с Cu-K_α-излучением (λ = 0,154 нм), работавшего при напряжении 40 кВ и токе 30 мА. Измерения проводились в диапазоне 2θ от 10° до 100°, для экспериментов ширина шага и время экспозиции были установлены на 0,05° и 3 с для каждого шага. Расшифровку дифрактограмм проводили с помощью программы полнопрофильного анализа POWDER CELL (версия 2.4). Шероховатость поверхности покрытий определялась с помощью профилометра модели 130 (ОАО «Завод ПРОТОН», г. Москва, Россия) в среднем по пяти измерениям. Измерение микротвердости образцов проводилось по поперечному сечению покрытий (10 замеров для каждого типа покрытия) на микротвердомере «Метолаб 502» (Метолаб, Россия), при нагрузках на индентор 100 г и времени выдержки 10 с. Трибологические испытания на трение и износ проводились на Трибометре TRB^3 (Anton-Paar, Buchs, Швейцария) с использованием стандартной методики «шар-диск», где в качестве контртела использовали шарик диаметром 6,0 мм из стали с покрытием 100Cr6, при нагрузке 10 Н и линейной скорости 3 см/сек, радиусом кривизны износа 2 мм, пути трения 100 м.

Результаты и анализы

На рисунке 3 представлены результаты исследования фазового состава порошка и металлокерамических покрытий 86WC-10Co-4Cr, полученных методом HVOF при различных расстояниях напыления (L1 – 100 мм, L2 – 200 мм, L3 – 300 мм). Рентгеноструктурный анализ показывает, что исходный порошок WC-10Co-4Cr состоит из основной фазы высшего карбида вольфрама, а также фаз вольфрама W, кобальта Co и η фазы – Co_3W_3C (Co_6W_6C) (рисунок 3, г). Распределения η фазы отражается на рентгеновском дифракционном спектре только в области малых углов. Когда порошок подвергался воздействию пламени HVOF, наблюдались некоторые изменения в рентгенограмме. В покрытиях обнаружены фазы WC, низшего карбида вольфрама W_2C, оксида кобальта CoO, последние, две из которых, получены в результате термического разложения порошка при напылении, что согласуется с исследованием автора [50]. Опираясь на диаграмму состояния двойной системы W-C, можно предположить, что в интервале температур 2400–2800 °C происходит потеря углерода из фазы WC, что приводит к формированию хрупкой фазы W_2C [51]. А образование оксидной фазы CoO объясняется тем, что при высокоскоростном газопламенном напылении используется окислительная среда газопламенных продуктов кислородно-пропановой смеси, что приводит к более интенсивному взаимодействию WC с кислородом. В результате чего происходит частичная потеря углерода, следовательно, избыток углерода, образующийся в результате растворения WC, диффундирует в металлическую матрицу и образует другую карбидную W_2C и оксидную CoO фазу.



покрытия 86WC-10Co-4Cr: L1 – (а); L2 – (б); L3 – (в); порошок 86WC-10Co-4Cr (г)

Рисунок 3. Диаграммы порошков WC-10Co-4Cr и покрытий при разных дистанциях напыления

При расстоянии 300 мм, можно увидеть уменьшение интенсивности низших карбидов W_2C, что указывает на то, что процесс HVOF при низкой температуре и высокой скорости может эффективно препятствовать обезуглероживанию. Также, можно заметить, что на дифрактограммах (рисунок 3, а, б, в) отсутствует рефлексы η фазы Co_3W_3C, поскольку она была нестабильна во время напыления HVOF, что также подтверждается с другим исследованием [52].

В таблице 3 приведены данные о фазовом составе покрытий, проанализированных программой полнопрофильного анализа POWDERCELL (версия 2.4). Графически сравнивались экспериментальные и расчетные дифрактограммы, определены содержание фаз в каждом покрытий, параметры решетки фазы, области когерентного рассеяния (ОКР) кристалла и значение микронапряжения ($\Delta d/d \cdot 10^{-3}$). Согласно, анализу фазового состава (таблица 3), проведенного методом XRD (рисунок 3), в покрытиях были обнаружены фазы: WC, W_2C и CoO. Во всех покрытиях размер кристаллитов, рассчитанный с использованием программы POWDERCELL, для фазы WC составляет около 44 нм, а для фаз W_2C и CoO он был разным, как показано на таблице 3. Чем больше размер кристаллита, тем более узкие дифракционные линии на дифрактограмме или, наоборот, чем меньше, тем шире они [53]. Параметры решетки предоставляют точную информацию о структуре фаз, в то время микронапряжение позволяет оценить внутренние деформации кристаллических решеток фазы. Чем больше значение микронапряжения, тем больше кристаллические структуры фаз подвергаются внутренним деформациям [53]. Следовательно, из таблицы 3 видно, что на покрытиях L1 и L2 кристаллические решетки фаз W_2C и CoO испытывают значительные внутренние деформации. На основе рентгеноструктурного полнопрофильного анализа покрытий 86WC-10Co-4Cr, также определено процентное содержание отдельных фаз. Содержание фазы WC во всех покрытиях L1, L2 и L3 составило 49%, 55%, 57% и для фазы W_2C – 20%, 19%, 11%, соответственно. Можно заметить, что содержание оксидной фазы CoO в покрытии при расстоянии 100 мм было больше, чем в остальных покрытиях. Это свидетельствует о том, при близком расстоянии, покрытие больше подвергается к окислению под воздействием высоких температур. Низкое содержание W_2C в покрытии L3 указывает на низкую степень разложения карбида WC до W_2C, можно предположить, что с увеличением расстояния напыления, порошок меньше находится в высокой температуре, так как, температура пламени убывает при увеличении расстояния.

Кристаллографические параметры и идентификации фаз были взяты из базы данных ICDD PDF-2 с использованием программы полнопрофильного анализа POWDERCELL (версия 2.4). Для фаз CoO и Co_3W_3C использовались данные из базы данных кристаллических структур неорганических веществ (ICSD). Детальные результаты представлены в таблице 4.

На рисунке 4 представлена морфология поперечного сечения покрытий, полученных с варьированием расстояния напыления: L1 – 100 мм, L2 – 200 мм, L3-300 мм. Все покрытия плотно прилегают к подложке без каких-либо трещин и разрушений и признаков расслоения не наблюдалось. Для удобства, анализ проводился при разных увеличениях, чтобы получить более подробной информации о структуре покрытия и оценки его характеристик.

Таблица 3. Результаты рентгенофазового анализа

Образец	Обнаруженные фазы	Содержание фазы, Масс.%	Параметры решетки, Å	Размер ОКР, нм	$\Delta d/d \cdot 10^{-3}$
Покрытие L1	WC	49	a=2,9012 c=2,8321	41	0,552
	W_2C	20	a=2,9717 c=4,6936	28	2,234
	CoO	31	a=4.2516	21	5,057
Покрытие L2	WC	55	a=2,9015 c=2,8317	39	0,723
	W_2C	19	a=2,9721 c=4,6936	33	3,517
	CoO	26	a=4.2666	22	1,664
Покрытие L3	WC	57	a=2,9015 c=2,8320	44	0,037
	W_2C	11	a=2,9687 c=4,6876	31	1,7
	CoO	22	a=4.2654	8	1,581

Таблица 4. Кристаллографические параметры фаз

Фаза	Кристаллическая решетка	Картотека	Пространственная группа
WC	hexagonal	00-025-1047	P-6m2
W_2C	hexagonal	00-035-0776	P-3m1
W	cubic	00-004-0806	Im3m
Co	cubic	00-015-0806	Fm3m
CoO	cubic	ICSD 245320	Fm3m
Co_3W_3C	cubic	ICSD 617462	Fd3m

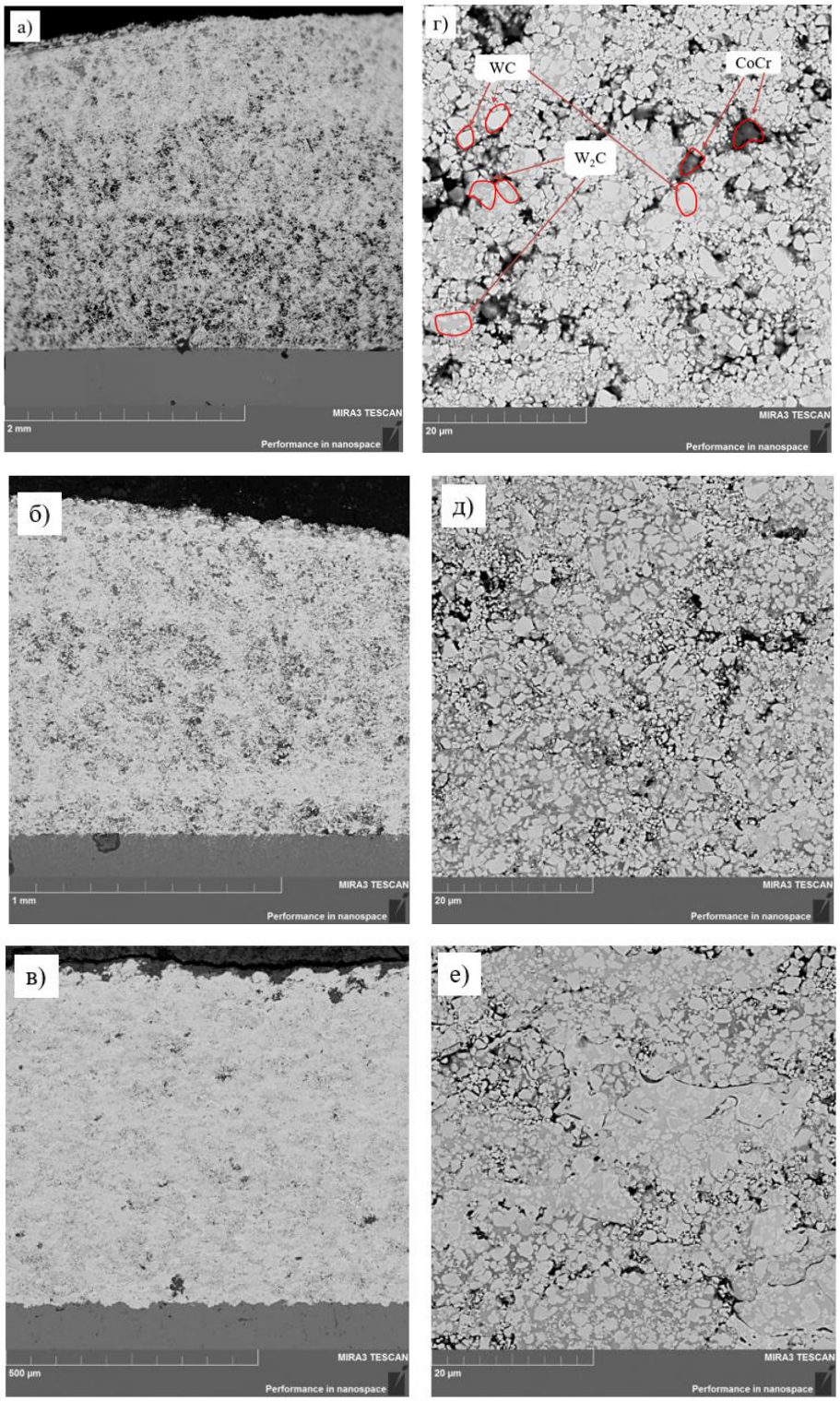
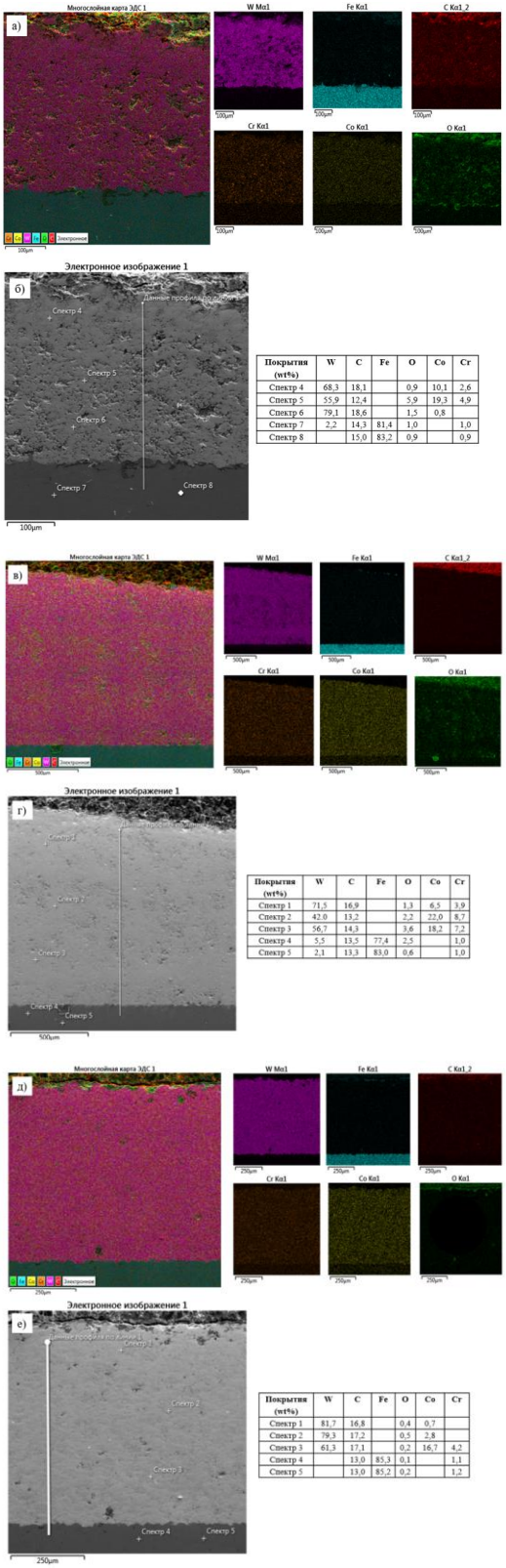


Рисунок 4. СЭМ-изображения морфологии поперечного сечения покрытий 86WC-10Co-4Cr, полученных с варьированием расстояния напыления: 100 мм (а, г); 200 мм (б, д); 300 мм (в, е)

Толщина трех покрытий варьировалась от 1,35 мм до 630 мкм. Установлено, что с увеличением расстояния напыления толщина металлокерамического покрытия уменьшается: h = 1,35 мм; h = 1,15 мм; h = 630 мкм для образцов L1, L2, L3 соответственно. Пористость покрытий оценивалась по СЭМ-изображениям с использованием программного обеспечения Altami Studio 4.0 для анализа изображений. Во всех покрытиях относительная пористость не превышала 2,5%, однако наименьшую пористость со значением 0,7% показало покрытие, полученное при расстоянии напыления 300 мм (рисунок 4, в).

Формирование пористых и малопористых структур в покрытиях может зависеть от различных факторов. Во-первых, это может быть связано с более эффективным нагреванием порошка до пластического состояния в процессе напыления. То есть, более интенсивное нагревание порошка при большем расстоянии напыления может способствовать формированию более компактного покрытия с уменьшением пористых свойств. Во-вторых, при увеличении расстояния напыления от распылителя к подложке, расширяется площадь пламени. Таким образом, частицы порошка разбрасывается на большую площадь подложки и с большей вероятностью будут покрывать всю поверхность подложки равномерно, что характеризуются плотной и однородной микроструктурой. Такая плотная структура обусловлена характерной особенностью процесса HVOF (главным образом, высокой кинетической энергией частиц) [54, 55]. Как показывает СЭМ-анализ, при расстоянии напыления 100 мм в микроструктуре покрытия образовались значительные и отчетливые микропоры. Возможно, это связано: во-первых, с перегревом частиц порошка из-за чрезмерно высокой температуры пламени; во-вторых, с кратковременным пребыванием частиц в пламени, что не дает частицу на равномерное распределение и расплавление. Указанные факторы приводят к неравномерному покрытию и образованию микропор. Из СЭМ-анализа поперечного сечения всех покрытий (рисунок 4, г, д, е) можно наблюдать, что частицы карбида вольфрама (WC) равномерно распределились в матричной фазе (CoCr). Темно-серого цвета, вероятно, является матрицей кобальт-хрома CoCr, светло-серые частицы представляют собой карбид вольфрама (WC). Связующее Co, однако, демонстрировало равномерное распределение среди основной фазы WC. Существует вероятность того, что низший карбид вольфрама W_2C может быть диспергирован в этом кобальтовом связующем, как показано на рисунке 3, г. Это предположение подтверждается рентгеноструктурными анализами, как показано на рисунке 3, а, б, в, где дисперсная фаза содержит вольфрам и имеет недостаток кобальта. Большинство деталей WC сохранили свою многоугольную форму белого цвета. Согласно многочисленным литературным источникам, образование W_2C вокруг WC объясняется обезуглероживанием WC в процессе HVOF [56–58].

На рисунке 5 представлены результаты анализа элементного картирования поперечного сечения покрытий, полученных с варьированием расстояния напыления: L1 –100 мм, L2 – 200 мм, L3 – 300 мм. EDS-анализ поперечных сечений продемонстрировал присутствие нескольких элементов, таких как W, C, O, Co и Cr, в то время как подложка из коррозионностойкой стали 30Х13 содержит элементы Fe, C.



Покрытия (wt%)	W	C	Fe	O	Co	Cr
Спектр 4	68,3	18,1		0,9	10,1	2,6
Спектр 5	55,9	12,4		5,9	19,3	4,9
Спектр 6	79,1	18,6		1,5	0,8	
Спектр 7	2,2	14,3	81,4	1,0		1,0
Спектр 8		15,0	83,2	0,9		0,9

Покрытия (wt%)	W	C	Fe	O	Co	Cr
Спектр 1	71,5	16,9		1,3	6,5	3,9
Спектр 2	42,0	13,2		2,2	22,0	8,7
Спектр 3	56,7	14,3		3,6	18,2	7,2
Спектр 4	5,5	13,5	77,4	2,5		1,0
Спектр 5	2,1	13,3	83,0	0,6		1,0

Покрытия (wt%)	W	C	Fe	O	Co	Cr
Спектр 1	81,7	16,8		0,4	0,7	
Спектр 2	79,3	17,2		0,5	2,8	
Спектр 3	61,3	17,1		0,2	16,7	4,2
Спектр 4		13,0	85,3	0,1		1,1
Спектр 5		13,0	85,2	0,2		1,2

Рисунок 5. Карты элементного распределения напыляемых элементов в анализируемом участке покрытия 86WC-10Co-4Cr: L1 – 100 мм (а); L2 – 200 мм (в); L3 – 300 мм (д) и точечный элементный анализ L1 – 100 мм (б); L2 – 200 мм (г); L3 – 300 мм (е)

Картографические анализы на рисунках 5, а, б иллюстрируют, что внутренние слои покрытий частично подвержены оксилению, в отличие от покрытия, полученного при расстоянии 300 мм. Это объясняется тем, что при высокоскоростном газопламенном напылении используется окислительная среда газопламенных продуктов кислородно-пропановой смеси, что приводит к более интенсивному взаимодействию WC с кислородом. В результате чего происходит частичная потеря углерода, следовательно, избыток углерода, образующийся в результате растворения WC, диффундирует в металлическую матрицу и образует другую карбидную фазу W_2C. Из покрытий L1 и L2 (рисунок 5, а, б, в) можно увидеть процесс окисления, вызванный высокой температурой частиц в процессе напыления. При более высокой температуре частицы имеют больше энергии, что ускоряет химические реакции, включая окисление. В результате происходит более интенсивное образование оксидных оболочек вокруг частиц WC. Это может быть особенно заметно при напылении в окислительной среде, где кислород стимулирует процессы окисления. Более высокая температура пламени и более длительное нахождение частиц в нем могут обуславливать более полное окисление. Но в нашем случае на покрытиях L1 и L2 произошло частичное окисление, так как оксиды занимают места, где расположены поры (рисунок 5, а, б). Более того, как показывает анализ, в покрытии L3 оксидов находится на поверхности меньше, чем в двух других покрытиях (L1 и L2), что может быть связано с более низкой температурой пламени (температура пламени снижается с увеличением расстояния напыления).

Элементный точечный анализ проводился во всех покрытиях в 3 различных областях (рисунок 5, б, г, е). Элементы W, C и Co, которые распределены по всему покрытию, наблюдаются в каждой точке, где проводился анализ. Было замечено, что оксид (O) в структуре покрытия L3 почти отсутствует, так как не превышает порога 0,4 (рисунок 5, е). Низкое содержание оксидов в структуре покрытии L3 выше уже упоминалось. Говоря с общей точки зрения, точечный анализ карты выявил в анализируемых покрытиях (L1, L2, L3), участки с повышенной концентрацией отдельных химических элементов: самая высокая концентрация вольфрама, также углерода.

На рисунке 6 можно изучить распределение элементов вдоль линии поперечного сечения покрытия. По линии, проведенной по всем трем покрытиям (L1, L2, L3), можно увидеть равномерное распределение вольфрама. Видно, что покрытие L1 продемонстрировало наиболее распределение оксидов от центра к подложке по вдоль линии (см. рисунок 6, а). Химический анализ также подтвердил, что покрытие L1 имело наибольшее содержание оксида внутри покрытия по сравнению с другими покрытиями L2 и L3 (рисунок 6, а, б). На остальных покрытиях (рисунок 6, б, с) можно увидеть, что с увеличением расстояния напыления, кислород начинают уменьшаться в покрытиях вдоль линии. Таким образом, по линии, проведенной в структуре покрытия L3, не было обнаружено оксидов.

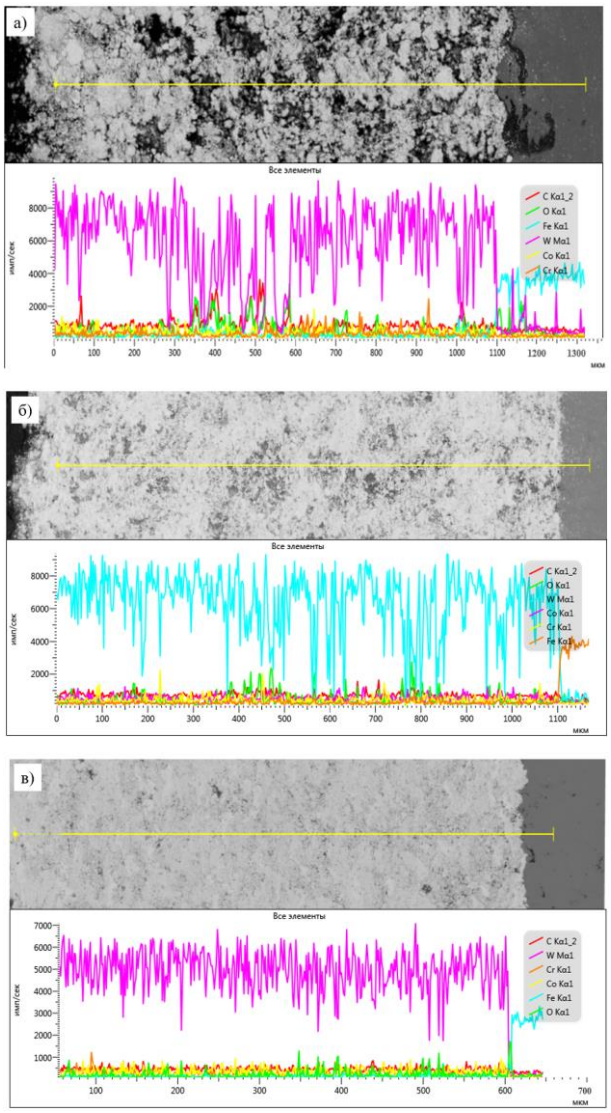


Рисунок 6. Распределение элементов по линии поперечного сечения металлокерамического покрытия 86WC-10Co-4Cr: L1 – 100 мм (а); L2 – 200 мм (б); L3 – 300 мм (в)

Исследования шероховатости покрытий показали, что изменение расстояния напыления с 100 мм до 300 мм влияет на параметр шероховатости, средние значения, которых составила 1.73, 1.93 и 2.03 мкм для образцов L1, L2 и L3 соответственно. С увеличением расстояния напыления, увеличивалась шероховатость покрытий. Кроме того, по мере увеличения расстояния напыления температура летящих частиц в пламени снижается, что приводит к увеличению количества холодных частиц вдали от горячего центра пламени. В результате поверхность покрытия приобретает развитый характер, характеризующий высокую шероховатость.

Результаты измерений средних значений микротвердости покрытий в зависимости от режима напыления показали, что, увеличение расстояния напыления ведет к увеличению значений микротвердости покрытий: L1 – 755±16, L2 – 797±11, L3 – 976±17. Это может быть объяснено несколькими факторами, одним из которых является увеличение объемной доли карбидов в покрытии при увеличении расстояния напыления до 300 мм. Результаты согласуются с исследованием автора [59], т.е. чем выше степень обезуглероживания, тем ниже твердость. Итак, последовательное уменьшение расстояния напыления с 300 до 100 мм сопровождается небольшим уменьшением микротвердости с 976±17 до 755±16 $HV_{0,1}$. Это свидетельствует о том, что при расстоянии напыления 100 мм, покрытие становится более мягким. Результаты исследования также согласуются с данными рентгеновского анализа (таблица 2), который указывает на наличие высоких концентраций фазы W_2C в покрытиях, полученных при расстояниях напыления 100 и 200 мм.

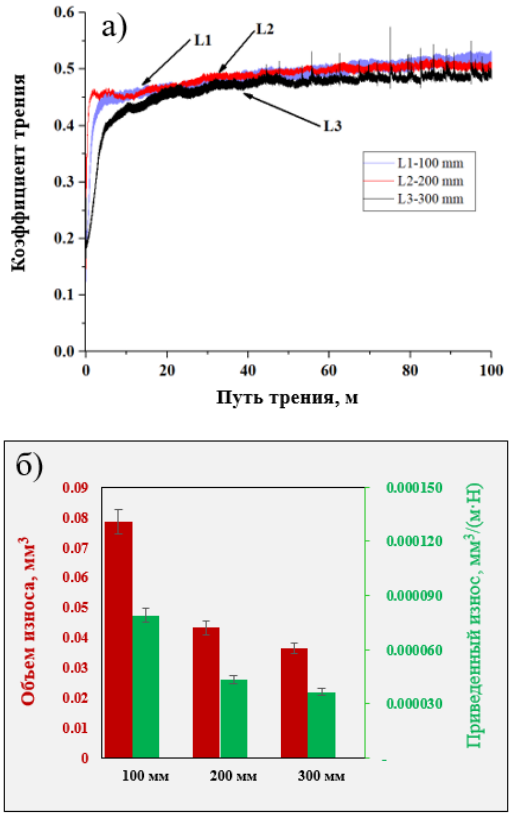


Рисунок 7. График зависимости коэффициента трения от пути трения (а) и зависимости объема износа от расстояния напыления (б)

График зависимости коэффициенты трения от пути трения и зависимости объем износа от расстояния напыления представлены на рисунке 7, а, б. Установлено, что с увеличением расстояния напыления средний коэффициент трения и объем износа металлокерамического покрытия 86WC-10Co-4Cr уменьшается: μ=0,488; μ=0,485; μ=0,463 и ν=0,079 мм^3; ν=0,043 мм^3; ν=0,036 мм^3 для образцов L1, L2, L3 соответственно (рисунок 7, а, б). Из рисунка 7, б видно, что максимальная износостойкость характерна для покрытия, полученного при расстоянии напыления 300 мм, минимум – для образца, полученного при расстоянии напыления 100 мм. Снижение износостойкости можно объяснить уменьшением содержание доли карбидной фазы WC.

Выводы

В рамках провнднннного исследования можно сделать следующие выводы:

1) Увеличение расстояния напыления позволило формировать высококачественные металлокерамические покрытия 86WC-10Co-4Cr, характеризующиеся высокой плотностью, отсутствием трещин и оксидных областей в структуре покрытий L3.

2) Пористость покрытий не превышало 2,5%. Наименьшую пористость со значением 0,7% показало покрытие, полученное при расстоянии напыления 300 мм.

3) Толщина всех покрытий варьировалась в диапазоне от 1,35 мм до 630 мкм. Установлено, что с увеличением расстояния напыления средняя толщина металлокерамического покрытия уменьшается.

4) Согласно данным, полученным с помощью СЭМ и элементного картирования, все покрытия состоят из частиц WC и W_2C, равномерно распределенных в металлической матрице CoCr. На элементной карте покрытий, полученных при расстояниях 100 и 200 мм, определены частичные области, насыщенные кислородом, что связано с окислительной средой, где кислород стимулирует процессы окисления. А при расстоянии 300 мм общее содержание оксидов в структуре покрытии не превышало 0,4%, что может быть связано с более низкой температурой пламени (температура пламени снижается с увеличением расстояния напыления).

5) Рентгеноструктурный анализ показал, что дистанция напыления оказывает значительное влияние на долю оксидной фазы CoO и низшего карбида W_2C. При увеличении расстояния напыления содержание оксидных и низший карбидных фаз уменьшались. Фазовый состав металлокерамических покрытий состоял из гексагонального WC, гексагонального карбида W_2C и кубического оксида в кобальте CoO.

6) Установлено, что максимальная микротвердость (976 $HV_{0.1}$) характерна для покрытия L3, минимальные значения микротвердости наблюдаются у покрытий L1 и L2, что объясняется увеличением содержания доли карбидной фазы WC с увеличением расстояния напыления.

7) При увеличении расстояния напыления наблюдалось увеличение шероховатости покрытий, которая составила 1,73 мкм, 1,93 мкм и 2,03 мкм для образцов L1 – 100 мм, L2 – 200 мм и L3 – 300 мм соответственно.

8) Выявлено, что максимальная износостойкость характерна для покрытия, полученного при расстоянии напыления 300 мм (объем износа 0,036 мм^3), а минимальная – для покрытия, полученного при расстоянии 100 мм (v=0,079 мм^3).

Финансирование

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № 14870977).

Литература / References

1. Шеров К.Т., Габдысалык Р. Анализ и исследование проблемы изготовления крупных задвижек для магистральных трубопроводов // Труды университета. Караганда: Изд-во КарГТУ. – 2018. – №1 (70) – С.13-17. [Sherov K.T., Gabdysalyk R. Analiz i issledovanie problemy izgotovleniya krupnykh zadvizhek dlya magistral'nykh truboprovodov // Trudy universiteta. Karaganda: Izd-vo KarGTU. – 2018. – No. 1 (70) – P.13-17.] (In Russ.)
2. https://www.youtube.com/watch?v=wg5IZN2noH0
3. https://www.uzpa.kz/about/
4. Полосков С. С. Проблемы наплавки уплотнительных поверхностей трубопроводной арматуры и пути их решения // Вестник Донского государственного технического университета. – 2019. – Т. 19. – № 4. – С. 349–356. [Poloskov S. S. Problemy naplavki uplotnitel'nykh poverkhnostey truboprovodnoy armatury i puti ikh resheniya // Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2019. – Vol. 19. – No. 4. – P. 349–356.] (In Russ.)
5. Туков С.А., Корчагина М.В., Киреев С.О. Проблемы герметичности шаровых кранов и методы их решения // Донской государственный технический университет. – 2018. – С. 12–15. [Tukov S.A., Korchagina M.V., Kireev S.O. Problemy germetichnosti sharovykh kranov i metody ikh resheniya // Donskoy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet. – 2018. – P. 12–15.] (In Russ.)
6. http://www.indmet.ru/tech/vyisokoskorostnoe-gazotermicheskoe-napyilenie-hvof
7. Keshavamurthy R., Sudhan M.D., Kumar A., Ranjan V., Singh P., Singh A. Wear behaviour of hard chrome and tungsten carbide-HVOF coatings // MaterialsToday: proceedings. – 2018. –Vol. 5. – P.24587–24594. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.256
8. Kumar H., Chittosiya Ch., Shukla V.N. HVOF Sprayed WC Based Cermet Coating for Mitigation of Cavitation, Erosion & Abrasion in Hydro Turbine Blade // MaterialsToday: Proceedings. – 2018. –Vol.5. – P.6413–6420. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.253
9. Li G.P., Peng Y.B., Yan L.W., Xu T., Long J.Z., Luo F.H. Effects of Cr concentration on the microstructure and properties of WC-Ni cemented carbides // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Vol. 9. – P. 902–907. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.030
10. Дружнова Я.С. Развитие методов газотермического напыления упрочняющих покрытий на основе карбидов вольфрама и хрома (обзор) // Труды ВИАМ. – 2022. – № 10 (116). (In Russ.)
11. Jianxing Yu, Xin Liu, Yang Yu, Haoda Li, Pengfei Liu, Kaihang Huang and Ruoke Sun. Research and Application of High-Velocity Oxygen Fuel Coatings // Coatings. – 2022. – Vol. 12(6). – P. 828. https://doi.org/10.3390/coatings12060828
12. Samodurova, M., Shaburova, N., Samoilova, O., Moghaddam A.O., Pashkeev K., Ul'yanitckiy V., Trofimov E. Properties of WC–10%Co–4%Cr Detonation Spray Coating Deposited on the Al–4%Cu–1%Mg Alloy // Materials. – 2021. – Vol. 14(5). https://doi.org/10.3390/ma14051206
13. Ghadami F., Sabour Rouh Aghdam A. Improvement of high velocity oxy-fuel spray coatings by thermal post-treatments: A critical review // Thin Solid Films. – 2019. – Vol. 678. – P. 42–52. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.02.019
14. S. Hong, Y.P. Wu, Q. Wang, G.B. Ying, G.Y. Li, W.W. Gao, B. Wang, and W.M. Guo. Microstructure and Cavitation-Silt Erosion Behavior of High-Velocity Oxygen-Fuel (HVOF) Sprayed Cr_3C_2-NiCr Coating // Surface and Coatings Technology. – 2013. – Vol. 225. – P.85–91. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.03.020
15. M. Gui, R. Eybel, B. Asselin, S. Radhakrishnan, and J. Cerps. Influence of Processing Parameters on Residual Stress of High Velocity Oxy-Fuel Thermally Sprayed WC-Co-Cr Coating // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2012. – Vol. 21(10). – P.2090–2098. https://doi.org/10.1007/s11665-012-0134-2
16. J.K.N. Murthy, B. Venkataraman. Abrasive wear behaviour of WC–CoCr and Cr_3C_2–20(NiCr) deposited by HVOF and detonation spray processes // Surface and Coatings Technology. – 2006. – Vol. 200(8). – P. 2642–2652. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.10.136
17. D.W. Wheeler, R.J.K. Wood. Erosion of hard surface coatings for use in offshore gate valves // Wear. – 2005. – Vol. 258. – Issues 1–4. – P. 526–536. https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.035
18. V. Ulmanu, M. Bădicioiu, M. Călţaru and etc. Research regarding the hard-facing of petroleum gate valves by using high velocity oxygen fuel technology // Journal of the Balkan Tribological Association. – 2010. Vol. 16(4). – P. 551–557
19. M. Caltaru, M. Badicioiu, R. G. Ripeanu. Establishing the tribological behaviour of HVOF hardfacing applied at petroleum gate valves // Journal of the Balkan Tribological Association. – 2013. – Vol. 19. – No 3. – P. 448–460.
20. Hemant Kumar, Chetan Chittosiya, V.N. Shukla. HVOF Sprayed WC Based Cermet Coating for Mitigation of Cavitation, Erosion & Abrasion in Hydro Turbine Blade // MaterialsToday: Proceedings. – 2018. – Vol. 5. – Issue 2. – Part 1. – P. 6413–6420. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.253
21. S. Tan, J.A. Wharton, and R.J.K. Wood. Solid Particle Erosion Corrosion Behaviour of a Novel HVOF Nickel Aluminium Bronze Coating for Marine Applications-Correlation Between Mass Loss and Electrochemical Measurements // Wear. – 2005. – Vol. 258. – P. 629–640. https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.02.019
22. Thakur and N. Arora. Sliding and Abrasive Wear Behavior of WC-CoCr Coatings with Different Carbide Sizes // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2013. – Vol. 22(2). – P. 574–583. https://doi.org/10.1007/s11665-012-0265-5
23. W. Zo´rawski and S.J. Skrzypek. Tribological Properties of Plasma and HVOF-Sprayed NiCrBSi-Fe_2O_3 Composite Coatings // Surface and Coatings Technology. – 2013. –

Vol. 220. – P. 282–289. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.09.057
24. You Yu, Yuping Wu, Sheng Hong, Jiangbo Cheng, Shuai-shuai Zhu, Hongyu Li. Microstructure and wear behavior of the (AlCoCrFeNi)x/(WC–10Co)1-x composite coatings produced via high velocity oxy-fuel thermal spraying // Ceramics International. – 2023. – Vol. 49. – Issue 17. – Part B. – P. 28560–28570. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.06.148
25. X. Ding, X.-D. Cheng, J. Shi, C. Li, C.-Q. Yuan, Z.-X. Ding. Influence of WC size and HVOF process on erosion wear performance of WC-10Co4Cr coatings // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. https://doi.org/10.1007/s00170-017-0795-y
26. B. Song, Z. Pala, K. Voisey, T. Hussain. Gas and liquid-fuelled HVOF spraying of Ni50Cr coating: microstructure and high temperature oxidation // Surface and Coatings Technology. – 2017. – Vol. 318. – P. 224–232. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.07.046
27. G.R. Holcomb. Calculation of reactive-evaporation rates of chromia // Oxidation of Metals. – 2008. – Vol. 69. – P. 163–180.
28. A. Karimi, C. Verdon, G. Barbezat. Microstructure and hydroabrasive wear behaviour of high-velocity oxy-fuel thermally sprayed WC–Co (Cr) coatings // Surface and Coatings Technology. – 1993. – Vol. 57. – Issue 1. –P. 81–87. https://doi.org/10.1016/0257-8972(93)90340-T
29. Kim, H.J., Kweon, Y.G. and Chang, R.W. Wear and Erosion Behavior of Plasma-Sprayed WC-Co Coatings // Journal of Thermal Spray Technology. – 1994. – Vol. 3. – P. 169–178.
30. Suresh Babu, P., Basu, B. and Sundararajan, G. Abrasive Wear Behavior of Detonation Sprayed WC-12Co Coatings: Influence of Decarburization and Abrasive Characteristics // Wear. – 2010. – Vol. 268. – P. 1387–1399. https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.02.013
31. Kumari, K., Anand, K., Bellacci, M. and Giannozzi, M. Effect of Microstructure on Abrasive Wear Behavior of Thermally Sprayed WC-10Co-4Cr Coatings // Wear. – 2010. – Vol. 268. – P. 1309–1319. https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.02.001
32. Maharajan S., Michael Thomas Rex F., Ravindran D., Rajakarunakaran S. Erosive and corrosive wear performance and characterization studies of plasma-sprayed WC/Cr_3C_2 coating on SS316 // Applied Ceramic Technology. – 2022. https://doi.org/10.1111/ijac.14118
33. Bhosale D.G., Ram Prabhu T., Rathod W.S. Sliding and erosion wear behaviour of thermal sprayed WC-Cr3C2-Ni coatings // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 400. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126192
34. Vats A, Patnaik A., Meena M.L, Shringi D. Role of microfactors on microstructure and on the tribological performance of HVOF coatings: A review // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1017/1/012010
35. Robert J.K. Wood, S. Herd, Mandar R. Thakare. A critical review of the tribocorrosion of cemented and thermal sprayed tungsten carbide // Tribology International. – 2018. – P. 491–509. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.10.006
36. Zhou W.X., Zhou K.S., Li Y.X., Deng C.M., Zeng K.L. High temperature wear performance of HVOF-sprayed Cr_3C_2-WC-NiCoCrMo and Cr_3C_2-NiCr hardmetal coatings // Applied Surface Science. – 2017. – Vol. 416. – P. 33–44. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.04.132
37. Gopi R., Saravanan I., Devaraju A., Ponnusamy P. Tribological behaviour of thermal sprayed high velocity oxy-fuel coatings on tungsten carbide – A review // Materials Today: Proceeding. – 2020. – Vol. 39. – P. 292–295. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.133
38. Picas J.A. [et al.]. Microstructure and wear resistance of WC–Co by three consolidation processing techniques // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2009. – Vol. 27. – P. 344–349. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.07.002
39. H.J.C. Voorwaldb, R.C. Souzaa, W.L. Pigatinc, M.O.H. Cioffi. Evaluation of WC–17Co and WC–10Co–4Cr thermal spray coatings by HVOF on the fatigue and corrosion strength of AISI 4340 steel // Surface & Coatings Technology. – 2005. – Vol. 190. – Issues 2–3. – P. 155–164. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.08.181
40. Richard De Medeiros Castro, Luiz Carlos De Cesaro Cavaler et al. Revestimento WC depositado por aspersão térmica (HVOF) como alternativa ao cromo duro eletro-depositado aplicados em equipamentos hidráulicos // Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. – 2015. – Vol. 19. – No. 2. – P. 27–42.
41. Dent, A.H., S. DePalo, and S. Sampath. Examination of the wear properties of HVOF sprayed nanostructured and conventional WC-Co cermets with different binder phase contents // Journal of Thermal Spray Technology. – 2002. – Vol. 11(4). – P. 551–558.
42. Holmberg, K. and A. Matthews. Coating Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering // Tribology and Interface Engineering. – 2009.
43. N. Ma, L. Guo, Z. Cheng, H. Wu, F. Ye, K. Zhang, Improvement on mechanical properties and wear resistance of HVOF sprayed WC- 12Co coatings by optimizing feedstock structure // Applied Surface Science. – 2014. – Vol. 320. – P. 364–71. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.09.081
44. Laukkanen, A., et al. Tribological contact analysis of a rigid ball sliding on a hard coated surface, Part III: Fracture toughness calculation and influence of residual stresses // Surface and Coatings Technology. – 2006. – Vol. 200. – Issues 12–13. – P. 3824–3844. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.03.042
45. https://plasmascience.kz/ru/nczp/oborudovaniya
46. Установка высокоскоростного напыления HVOF Termika-3 // Техническое описание и инструкция по эксплуатации, г. Санкт-Петербург. – 2021. [Ustanovka vysokoskorostnogo napyleniya HVOF Termika-3 // Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii, g. Sankt-Peterburg. – 2021.] (In Russ.)
47. Fauchais P.L., Heberlein J.V.R., Boulos M.I. Thermal Spray Fundamentals, From Powder to Part. Springer. – 2014.
48. A. Agu¨ero, F. Camo´n, J. Garcı´a de Blas, J.C. del Hoyo, R. Muelas, A. Santaballa, S. Ulargui, and P. Valle´s. HVOF-Deposited WCCoCr as Replacement for Hard Cr in Landing Gear Actuators // Journal of Thermal Spray Technology. – 2011. https://doi.org/10.1007/s11666-011-9686-1
49. Wang, Q.; Zhong, Y.; Li, H.; Wang, S.; Liu, J.; Wang, Y.; Ramachandran, C.S. Effect of Cobalt and Chromium Content on Microstructure and Properties of WC-Co-Cr

Coatings Prepared by High-Velocity Oxy-Fuel Spraying // Materials. – 2023. – Vol. 16. – P. 7003. https://doi.org/ 10.3390/ma16217003
50. Marina Magnania, Patrícia Hatsue Suegamaa, Abel André Cândido Reccob, Josep Maria Guilemanyc, Cecílio Sadao Fugivaraa, Assis Vicente Benedettia. WC-CoCr coatings sprayed by high velocity oxygen-fuel (HVOF) flame on AA7050 aluminum alloy: electrochemical behavior in 3.5% NaCl solution // Materials Research. – 2007.
51. А.С. Курлов, А.И. Гусев. Фазовые равновесия в системе W-C и карбиды вольфрама // Успехи химии. – 2006. – № 75 (7). [A.S. Kurlov, A.I. Gusev. Fazovye ravnovesiya v sisteme W-C i karbidy vol'frama // Uspekhi khimii. – 2006. – No. 75 (7).] (In Russ.)
52. Q. Wang, Z. Tang, and L. Cha. Cavitation and Sand Slurry Erosion Resistances of WC-10Co-4Cr Coatings // J. Mater. Eng. Perform. – 2015. – Vol. 24(6). – P. 1–9. https://doi.org/10.1007/s11665-015- 1496-z
53. Kuznetsova G (2005). Qualitative X-ray phase analysis. Course of lectures. Irkutsk, 28. (In Russ.)
54. Wang, Q.; Zhong, Y.; Li, H.; Wang, S.; Liu, J.; Wang, Y.; Ramachandran, C.S. Effect of Cobalt and Chromium Content on Microstructure and Properties of WC-Co-Cr Coatings Prepared by High-Velocity Oxy-Fuel Spraying. Materials 2023, 16, 7003. https://doi.org/10.3390/ma16217003
55. Ji Liu, Tongzhou Chen, Chengqing Yuan, Xiuqin Bai. Performance Analysis of Cavitation Erosion Resistance and Corrosion Behavior of HVOF-Sprayed WC-10Co-4Cr, WC-12Co, and Cr3C2-NiCr Coatings // J Therm Spray Tech. – 2020. https://doi.org/10.1007/s11666-020-00994y
56. Wang, Q.; Zhang, S.-Y.; Cheng, Y.-L.; Xiang, J.; Zhao, X.-Q.; Yang, G.-B. Wear and corrosion performance of WC-10Co4Cr coatings deposited by different HVOF and HVAF spraying processes // Surf. Coat. Technol. – 2013. – Vol. 218. – P. 127–136.
57. Picas, J.A.; Punset, M.; Baile, M.T.; Martín, E.; Forn, A. Effect of oxygen/fuel ratio on the in-flight particle parameters and properties of HVOF WC-CoCr coatings // Surf. Coat. Technol. – 2011. – Vol. 205. – P. 364–368.
58. Chen, X.; Li, C.-D.; Gao, Q.-Q.; Duan, X.-X.; Liu, H. Comparison of Microstructure, Microhardness, Fracture Toughness, and Abrasive Wear of WC-17Co Coatings Formed in Various Spraying Ways // Coatings. – 2022. – Vol. 12. – P. 814.
59. G.S. Pisarenki, V.A. Borisenko, and Y.A. Kashtalyan, Effect of Temperature on the Hardness and Modulus of Elasticity of Tungsten and Molybdenum in the Temperature Range of 20 to 2700C // Sov. Powder Metall. Met. Ceram. – 1962. Vol. 5. – P. 371–372. (In Russ.)

HVOF ӘДІСІМЕН АЛЫНҒАН 86WC-10Co-4Cr НЕГІЗІНДЕГІ ЖАБЫНДАРДЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ-ФАЗАЛЫҚ КҮЙІНЕ ЖӘНЕ МЕХАНИКАЛЫҚ-ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ БҮРКУ ҚАШЫҚТЫҒЫНЫҢ ӨЗГЕРУІНІҢ ӘСЕРІ

Б. К. Рахадилов[1], Н. Мұқтанова[2,3*], Д. Н. Кәкімжанов[2,3]

[1] Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен, Қазақстан
[2] Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан
[3] «PlasmaScience» ЖШС, Өскемен, Қазақстан

** Байланыс үшін E-mail: nmuktanova@bk.ru*

Жұмыста бүрку қашықтығын өзгерту арқылы TERMIKA-3 қондырғысында HVOF әдісімен алынған 86WC-10Co-4Cr жабындарын металлографиялық және трибологиялық зерттеу нәтижелері келтірілген. Бүрку қашықтығының жабынның микроқұрылымына, фазалық құрамына, сондай-ақ механикалық және трибологиялық қасиеттеріне әсері зерттелді. Элементтердің фазалық құрамы, микроқұрылымы және таралуы рентгендік дифракция (РД), сканерлеуші электронды микроскопия (СЭМ) және энергия дисперсиялық спектроскопия (ЭДС) әдістерін қолдану арқылы талданды. Сынамалардың қаттылығы Виккерс әдісімен микро-қаттылық өлшегіште өлшенді, үйкеліс коэффициенті мен тозу дәрежесі үйкеліс пен тозу өлшегішінің көмегімен зерттелді. Зерттеу нәтижелеріне сәйкес, тозуға төзімділігі мен қаттылығы жоғары және кеуектілігі төмен 86WC-10Co-4Cr жабындарын алу үшін оңтайлы бүрку қашықтығы 300 мм екені анықталды.

Түйін сөздер: *тозуға төзімділік, металл-керамикалық жабын, микроқұрылым, фазалық құрам, жоғары жылдамдықты оттегі-отындық тозаңдау, үйкеліс коэффициенті.*

INFLUENCE OF VARYING THE SPRAYING DISTANCE ON THE STRUCTURAL-PHASE STATE AND MECHANOTRIBOLOGICAL PROPERTIES OF 86WC-10Co-4Cr-BASED COATINGS OBTAINED BY THE HVOF METHOD

B. K. Rakhadilov[1], N. Muktanova[2,3*], D. N. Kakimzhanov[2,3]

[1] Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
[2] Daulet Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
[3] "PlasmaScience" LLP, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

** E-mail for contacts: nmuktanova@bk.ru*

This paper presents the results of a metallographic and tribological study of 86WC-10Co-4Cr coatings obtained by the HVOF method on the Termika-3 unit at varying spraying distances. The influence of spraying distance on the coating microstructure, phase composition, as well as mechanical and tribological properties, was studied. The phase composition, microstructure and elemental distribution were analyzed using X-ray diffraction, scanning electron microscopy and energy dispersive spectroscopy techniques. The hardness was measured on a Vickers microhardness tester, the friction coefficient and wear rate were investigated using a tribometer. According to the results of the study, it was found that the optimum spraying distance for 86WC-10Co-4Cr coatings with improved wear resistance and hardness characteristics and low porosity is 300 mm.

Keywords: *wear resistance, metalloceramic coating, microstructure, phase composition, high-speed oxyfuel spraying, coefficient of friction.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-105-114
УДК 533.9.03: 621.039.53: 539.261: 537.533.35

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ЖИДКОФАЗНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЛЬФРАМОВЫХ СПЛАВОВ

А. Е. Рыскулов[1], Б. С. Аманжулов[1,2*], И. А. Иванов[1,2], В. В. Углов[3], С. В. Злоцкий[3], А. М. Темир[1,2], А. Е. Курахмедов[1,2], А. Д. Сапар[1,2], Е. О. Унгарбаев[1, 2], М. В. Колобердин[1, 2]

[1] РГП «Институт ядерной физики» МЭ РК, Алматы, Казахстан
[2] НАО «Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева», Астана, Казахстан
[3] Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

** E-mail для контактов: amanzholovb96@gmail.com*

Настоящее исследование посвящено изучению влияния плазменного жидкофазного легирования на физико-механические свойства приповерхностного слоя вольфрама и его сплавов. Экспериментальные образцы вольфрама с покрытиями из меди и циркония подвергались воздействию компрессионными плазменными потоками (КПП). Элементный состав образцов определялся методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС), а деформация кристаллической решетки и остаточные напряжения оценивались методом рентгеновской дифракции. Результаты ЭДС показали, что плазменное воздействие приводит к формированию однородного сплава вольфрама и циркония в приповерхностном слое. Обработка вольфрама КПП вызывает увеличение уровня деформации решетки. В приповерхностном слое W-КПП обнаружены растягивающие напряжения величиной до 6 ГПа, тогда как для системы легированной медью W-Cu наблюдаются сжимающие напряжения, стремящиеся к нулю. Для системы W-Zr максимальные растягивающие напряжения достигают около 5–6 ГПа. Установлено, что введение меди в вольфрам существенно снижает уровень остаточных внутренних напряжений по сравнению с легированием цирконием. Полученные результаты могут способствовать разработке новых сплавов вольфрама с улучшенными эксплуатационными характеристиками для применения в термоядерной энергетике и других областях.

Ключевые слова: *сплавы вольфрама, радиационная стойкость, компрессионные плазменные потоки, плазменное жидкофазное легирование, остаточные механические напряжения, рентгеновская дифракция.*

Введение

Одним из самых перспективных и многообещающих направлений развития «чистой» энергии является термоядерная энергетика, основанная на управляемой ядерной реакции синтеза тяжелых элементов в результате слияния легких ядер, например, дейтерия (^{2}H) и трития (^{3}H). Для осуществления этой реакции, в токамаке (тороидальная камера с магнитными ловушками) плазма удерживается магнитным полем в вакуумной камере. Однако удержание плазмы несовершенно, и из-за магнитной конфигурации плазмы, потери энергии направлены к первой (внутренней) стенке и устройству в нижней части камеры для удаления внешних слоев плазменного шнура, называемому дивертором. Следовательно, материалы покрытия первой стенки и дивертора, обращенные к плазме (PFM, Plasma Facing Materials), должны выдерживать высокую тепловую нагрузку (10–20 МВт·м$^{-2}$), большой поток водородно-гелиевой плазмы (10^{20}–10^{24} м$^{-2}$·с$^{-1}$) и облучение высокоэнергетическими (14,1 МэВ) нейтронами. Поэтому одной из актуальных задач, решаемых на Казахстанском Материаловедческом Токамаке (КТМ), физический пуск которого был осуществлен в 2019 году, является изучение воздействия облучения заряженными частицами и плазмы на распыление и тепловую эрозию поверхности, накопление газовых примесей и изменение механических свойств перспективных материалов защиты первой стенки токамака [1].

Наиболее перспективным кандидатом в качестве PFM является вольфрам, благодаря сочетанию таких уникальных теплофизических свойств, как высокая температура плавления, низкий коэффициент распыления и теплового расширения, достаточно высокая теплопроводность и низкая активация при облучении нейтронами с энергией 14,1 МэВ. Тем не менее, вольфрам имеет несколько существенных недостатков, которые ограничивают его применение в термоядерной энергетике, а именно: высокая температура вязко-хрупкого перехода, охрупчивание после рекристаллизации, а также охрупчивание, вызванное нейтронным облучением. Радиационные эффекты блистеринга и флекинга, связанные с накоплением в поверхностных слоях вольфрама нерастворимых примесей (водорода, дейтерия, гелия), подтверждаются недавними исследованиями, которые показали, что облучение низкоэнергетическими ионами гелия и дейтерия приводит к значительной эволюции морфологии поверхности вольфрама. На поверхности вольфрама наблюдается блистеринг в результате низкоэнергетического дейтериевого облучения при температуре поверхности ниже 700 K [2]. Облучение низкоэнергетическими ионами гелия также вызывает образование пузырей [3], пор [4] и, в конечном итоге, «пуха» (fuzz) [5, 6] при температуре поверхности вольфрама от 800 до 2000 K. Такое изменение морфологии поверхности значительно ухудшает эксплу-

атационные характеристики PFM. Поэтому актуальной представляется задача разработки материалов на основе вольфрама, обладающих низкотемпературной пластичностью, высокой температурой рекристаллизации и повышенной радиационной стойкостью.

Многообещающим направлением дальнейших исследований представляется формирование вольфрамовых сплавов, обладающих улучшенными теплофизическими и физико-механическими свойствами по сравнению с чистым вольфрамом. Так, в работах [7, 8] сообщается, что добавление 5 атомных процентов (ат.%) Re снижает низкотемпературное охрупчивание вольфрама, однако коэффициент теплопроводности при этом уменьшается почти в два раза. Авторы [9, 10] показывают, что введение 5 ат.% Ta снижает образование пузырей на поверхности и уменьшает удержание дейтерия в вольфраме, но не улучшает пластичность материала. В работе [11] авторы указывают на улучшение механических свойств вольфрама при добавлении 10 ат.% Cr. Авторами в [12] показано значительное улучшение стойкости сплава WTi (2 ат.% Ti) к окислению в сравнении с чистым вольфрамом. Zr также улучшает сопротивление вольфрама к окислению за счет возможности образования оксидной пленки, и является малоактивируемым элементом [13]. Таким образом, дальнейшая разработка новых компонентов для сплавов на основе вольфрама, исследование элементного состава и пространственного распределения элементов в таких сплавах, а также изучение их физико-механических свойств представляет огромный научный и технологический интерес для развития термоядерной энергетики, радиационного материаловедения и плазменных методов обработки материалов.

Принципиально новым является предложение по использованию меди в качестве легирующего элемента и созданию сплава W-Cu. Известно, что медь и вольфрам абсолютно несмешиваемы как в жидком, так и в твердом состояниях, поэтому создание медь-вольфрамовых композитов происходит в виде многослойных покрытий при послойном их нанесении [14–16]. В настоящем исследовании предлагается осуществить легирование вольфрама атомами меди вследствие неравновесных скоростных процессов жидкофазного перемешивания и кристаллизации. В этом случае ожидается частное растворение компонентов друг в друге с образованием метастабильных твердых растворов, а также образованием дополнительных межфазных границ между несмешиваемыми фазами. Помимо этого, сплавы на основе вольфрама и меди склонны к аморфизации, протекание которой в приповерхностном слое также позволит повысить сопротивление материала радиационным нагрузкам.

Компрессионные плазменные потоки (КПП) представляют собой высокоэнергетические потоки плазмы, созданные в условиях высоких температур и давлений. При разряде в плазменном ускорителе поток плазмы движется к поверхности образца, и так как электроны имеют значительно большую скорость по сравнению с ионами, электронная волна достигает поверхности в первую очередь. Это приводит к испарению тонкого поверхностного слоя легированного покрытия. Испаряемые продукты, а также нейтральные атомы и ионы легированного металла, остаются у поверхности благодаря высокому давлению плазменной струи. Этот процесс создаёт газовое состояние испаряемых атомов, которое формирует ударно-сжатый слой, играющий роль переходной зоны между потоком плазмы и поверхностью обрабатываемого материала. Ударно-сжатый слой проводит тепловую энергию от плазмы к материалу, что приводит к нагреву поверхности образца. В частности, в случае вольфрама, основная часть энергии плазменного потока передается на нагрев его поверхности. Из-за теплопроводности материала, максимальная температура достигается на поверхности и постепенно снижается в глубину материала. В течение времени воздействия плазменного потока, составляющего 100 микросекунд, температура поверхности вольфрама постепенно увеличивается.

Таким образом, КПП вызывают значительные изменения в кристаллической решетке материала, включая внедрение дефектов, таких как вакансии и межузельные атомы. Эти дефекты приводят к образованию остаточных напряжений и деформаций, что оказывает влияние на механические свойства материала. Оценка радиационной стойкости материалов под воздействием КПП включает измерение остаточных напряжений и изменений в механических свойствах, а также сравнительный анализ с другими условиями облучения, например, с плазменным облучением токамаков. Плазменное облучение токамаков, хотя и представляет собой другой тип плазменного воздействия, также вызывает значительные изменения в материалах. Основные отличия включают интенсивность и длительность облучения, а также состав и температуру плазмы, что влияет на типы образующихся дефектов и их распределение. Сравнение КПП в среде азота и плазменного облучения токамаков помогает глубже понять процессы радиационной стойкости и поведение материалов под воздействием различных типов плазменного облучения.

Ключевая идея настоящего исследования заключается в возможности повышения радиационной стойкости вольфрама путем плазменного жидкофазного легирования приповерхностного слоя атомами переходных металлов, позволяющего контролировать его физико-механические свойства. Длительное воздействие (до 100 мкс) плазменного потока с высокой плотностью энергии на материал мишени приводит к разогреву до сверхвысоких температур и последующей скоростной кристаллизации расплавленного слоя, в результате чего происходит формирование дисперсной структуры, стабилизация метастабильных фаз и пересыщенных твердых растворов. В совокупности, все отмеченные структурные пре-

вращения способствуют положительному изменению с точки зрения радиационной стойкости физико-механических параметров приповерхностного слоя вольфрамовых сплавов.

Методы

Экспериментальные образцы представляли собой пластины технически чистого сплава вольфрама размером 10×10 мм и толщиной 2 мм. На поверхность предварительно отполированных и обезжиренных пластин наносились покрытия Cu и Zr методом вакуумно-дугового осаждения. Толщина сформированных покрытий варьировалась в диапазоне 2–3 мкм.

Впоследствии сформированные системы «вольфрам/металлическое покрытие» подвергались воздействию компрессионными плазменными потоками (КПП), которые генерировались в магнитоплазменном компрессоре компактной геометрии, в котором генерация плазмы осуществлялась при газовом разряде между электродами в среде остаточной атмосферы азота [17]. Давление остаточной атмосферы составляло 400 Па. Обработка проводилась серией по 3 импульса, следующих друг за другом через интервал времени 10–12 с, длительность одного импульса составляла 80–100 мкс. За счет трехкратной обработки достигалась однородность воздействия плазменного потока на поверхность материала, что приводило к однородному распределению легирующего материала в приповерхностном слое. Газовый разряд происходил в системе электродов при напряжении на накопительных конденсаторах 4,0 кВ. Расстояние между срезом электродов и образцом составляло 8 см. Согласно ранее проведенным калориметрическим исследованиям указанные режимы позволяют обеспечить плотность энергии, поглощаемой поверхностью образца, 55 Дж/см^2 [18]. Предварительные оценки показывают, что данный уровень энергии достаточен для плавления предварительно нанесенного металлического покрытия и части подложки вольфрама. Причем дальнейшее увеличение плотности энергии будет приводить к существенному испарению и абляции покрытия, снижая эффект жидкофазного легирования.

Плазменное воздействие позволяет сформировать в приповерхностном слое толщиной 5–8 мкм сплав однородного состава, включающего в себя вольфрам и элемент металлического покрытия.

Элементный состав указанных образцов был измерен с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Hitachi TM3030. Ускоряющее напряжение составляло 15 кВ, использовался энергодисперсионный кремниевый детектор. Относительная погрешность ЭДС составляла менее 5%.

Исследование структуры и качественный фазовый анализ проводились методом рентгеновской дифракции на дифрактометрах Rigaku Ultima IV для первой группы и Bruker D8 ADVANCE ECO для второй группы образцов, с использованием CuKα-излучения с длиной волны λ = 1,54178 Å. Рентгенограммы были получены в диапазоне 2θ от 20.000° до 99.968° с шагом Δ(2θ) = 0.050°±0.025°. Величины деформации кристаллической решетки (Δd/d) и остаточных напряжений (σ) были определены из соответствующих рентгенограмм. Программное обеспечение Bruker AXS DIFFRAC.EVA v.4.2 и международная база данных ICDD PDF-2 использовались для идентификации фаз и изучения кристаллической структуры.

Результаты и обсуждение

Результаты анализа элементного состава методом ЭДС образцов чистого вольфрама W, а также его сплавов W-Cu и W-Zr, предварительно обработанных компрессионными плазменными потоками с плотностью поглощенной энергии 55 Дж/см^2, представлены на рисунках 1–4. Рисунок 2 показывает отсутствие каких-либо примесей в образце чистого вольфрама, обработанного КПП. На рисунке 3 отчетливо видна граница между областями с преимущественным содержанием меди и вольфрама, что обусловлено частичным жидкофазным перемешиванием вольфрама и покрытия из меди, нанесенной методом вакуумно-дугового осаждения. На рисунке 3 также видны трещины на поверхности W-Cu (КПП), которые в композитах W-Cu могут образовываться из-за разницы в модуле Юнга и коэффициента теплового расширения между элементами, [19], а также быстрого охлаждения [20]. Из рисунка 4 ясно видно равномерное распределение вольфрама и циркония в результате полного жидкофазного перемешивания подложки из вольфрама и покрытия из циркония. Таблица 1 показывает элементный состав W, W-Cu, W-Zr, обработанных КПП, полученный с помощью ЭДС.

Таблица 1. Элементный состав W, W-Cu, W-Zr, обработанных КПП, согласно анализу ЭДС

Система	Концентрация элементов, ат.%		
	W	Cu	Zr
W	100	—	—
W-Cu	92,1±2.8	7,9±0.1	—
W-Zr	66,4±2.7	—	33,6±0.8

Данные рентгеноструктурного анализа образцов W, W-Cu, W-Zr, обработанных КПП с плотностью поглощенной энергии 55 Дж/см^2, а также исходного (необработанного) вольфрама ($W_{исх.}$) представлены на рисунке 5. Наиболее интенсивные дифракционные линии соответствуют фазе a-W. Сопоставление интенсивностей рентгеновских линий от исходного вольфрама $W_{исх.}$ и W-КПП свидетельствуют о формировании преимущественной ориентации (211) в обработанных образцах. Данная ориентация плоскостей сохраняется и в случае сплава W-Zr, но не наблюдается в сплаве W-Cu, обработанных КПП.

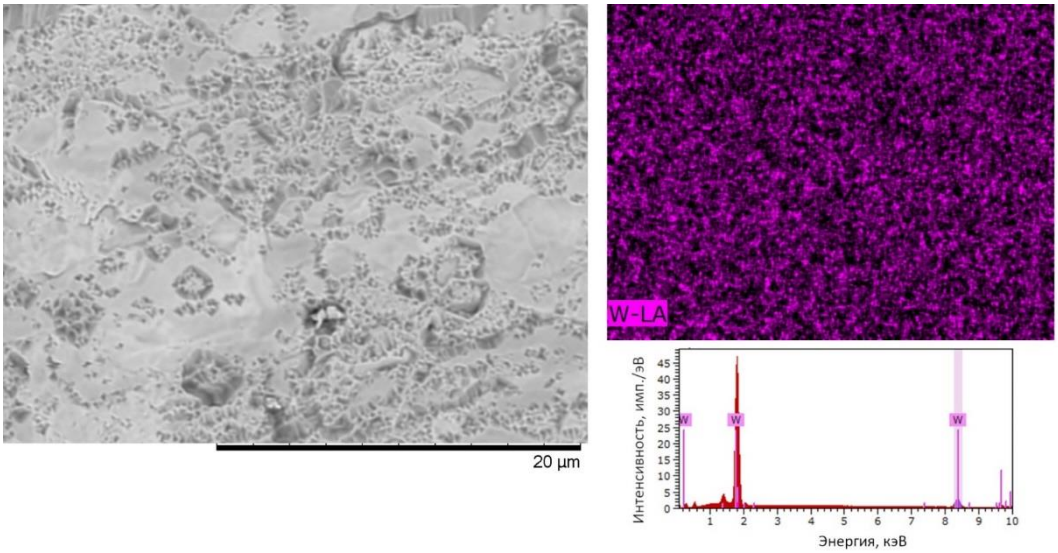


Рисунок 1. Снимок РЭМ и карта распределения элементов в образце необработанного W, полученная с помощью ЭДС

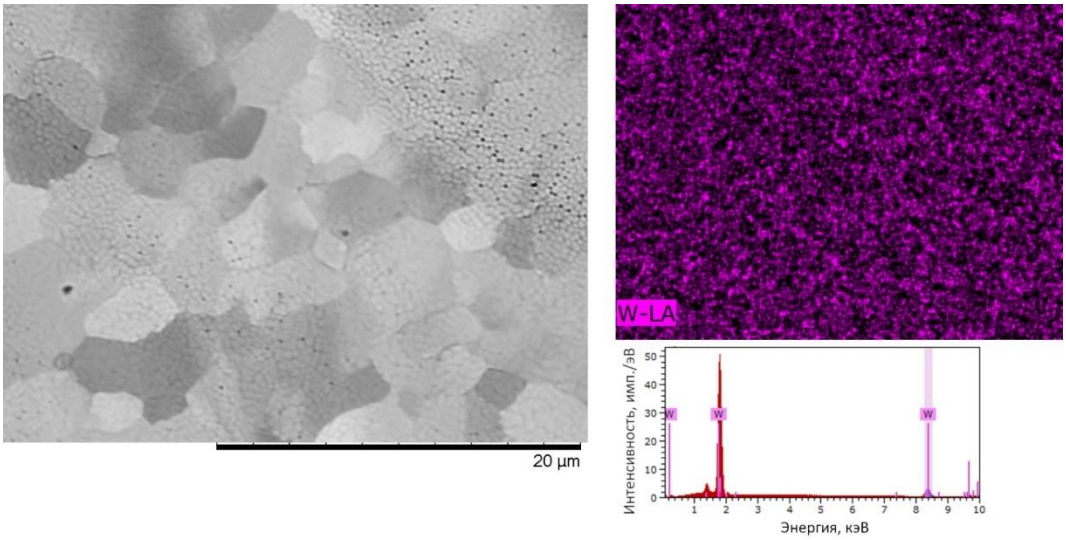


Рисунок 2. Снимок РЭМ и карта распределения элементов в образце W (КПП), полученная с помощью ЭДС

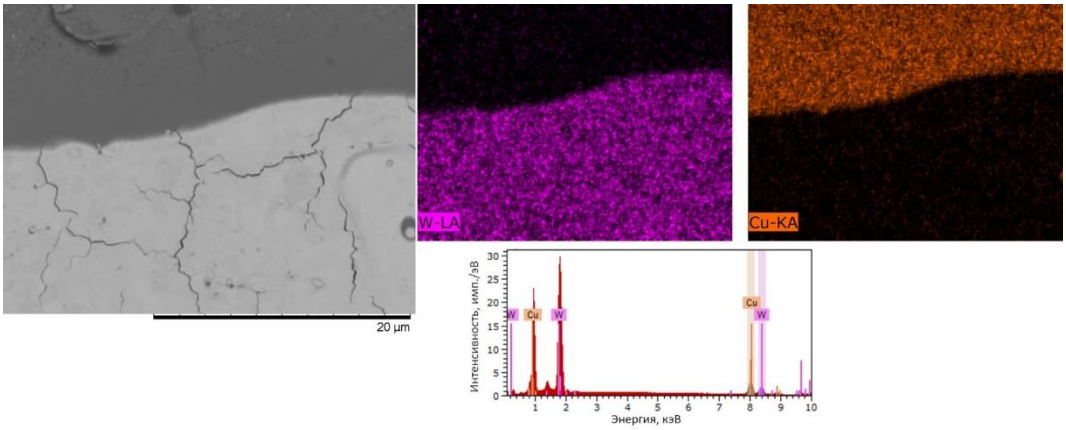


Рисунок 3. Снимок РЭМ и карта распределения элементов в образце W-Cu (КПП), полученная с помощью ЭДС

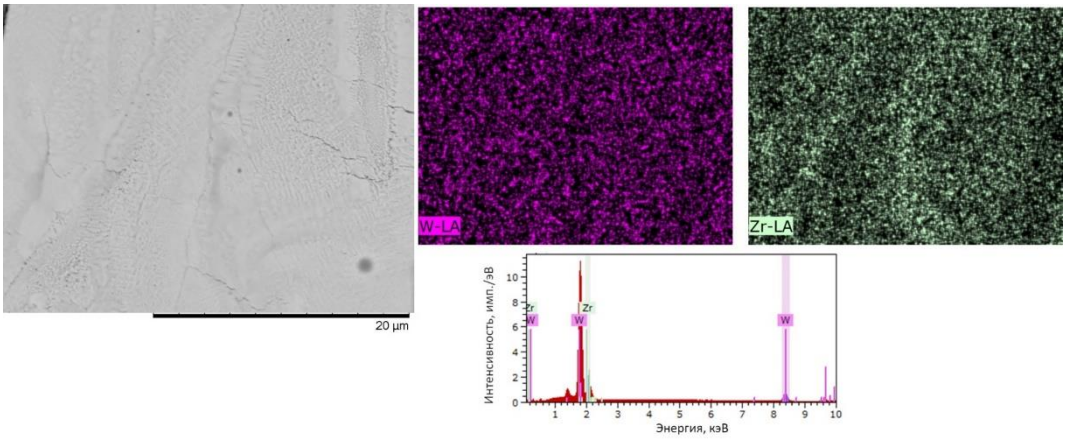
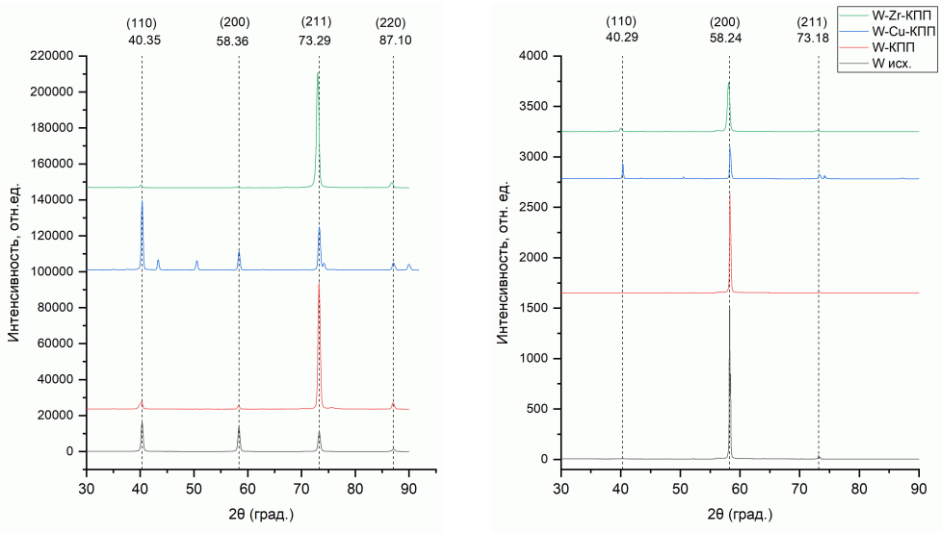


Рисунок 4. Снимок РЭМ и карта распределения элементов в образце W-Zr (КПП), полученная с помощью ЭДС



а) б)

Рисунок 5. Рентгенограммы исходного вольфрама $W_{исх.}$ и W, W-Cu, W-Zr, обработанных КПП при плотности поглощенной энергии 55 Дж/см^2, для дифрактометров Rigaku (а) и Bruker (б)

Анализ рентгеновских спектров на рисунке 6 показал, что обработка образцов КПП с плотностью поглощенной энергии 55 Дж/см^2 приводит к образованию новых фаз. Выводы о присутствии оксидов и углеродных соединений, основывались на сравнении с картами из базы дифракционных данных ICDD PDF. Основные использованные карты: W (no. 00-004-0806), W_2C (no. 00-035-0776), WC (no. 00-025-1047), Cu (no. 00-004-0836), ZrO_2 (00-036-0420, 01-073-9894), W_2Zr (no. 01-072-3378), ZrN (no. 00-035-0753), WO_2 (no. 01-071-0614), WO_3 (no. 00-005-0388). Был проведен качественный анализ, где предполагалось наличие оксида или углеродного соединения, если были найдены два и более дифракционных пика подходящей интенсивности на одной рентгенограмме, или пики со схожей угловой позицией в двух рентгенограммах.

На рентгенограммах W-КПП и W-Cu-КПП были обнаружены пики соединения WO_3, которое может образоваться в ходе облучения ионами азота [21]. WO_3 могут быть опасными для реакторов синтеза, так как образуются при контакте с воздухом, окислении и высоких температурах более 600–800 °C, и могут быть радиоактивными [22], поэтому разрабатываются сплавы вольфрама с большим сопротивлением окислению. Также в этих двух сплавах обнаружены фазы WO_2, которые могут возникать как при более низких температурах, чем для WO_3 [23], так и при спекании вольфрама при высокой температуре более 1000 °C [24]. На рисунке 6 в W-КПП и W-Cu-КПП есть пики, которые были определены как возможные пики WC, W_2C, которые, например, образуются при обработке вольфрама плазмой из метана начиная с 1000 °C [25]. При обработке образцов вольфрама и сплавов КПП с плотностью энергии 55 Дж/см^2 в данной работе, температура поверхности могла достигать 3500 К [20].

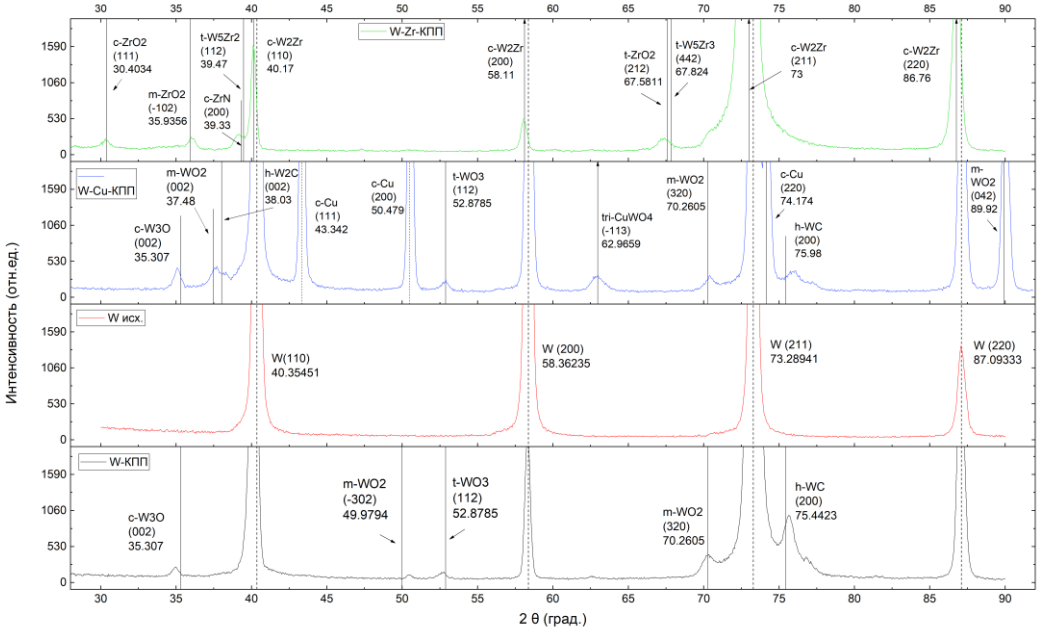


Рисунок 6. Рентгенограммы исходного вольфрама $W_{исх}$ и W, W-Cu, W-Zr, обработанных компрессионными плазменными потоками при плотности поглощенной энергии 55 Дж/см^2 в увеличенном масштабе по интенсивности, полученные из рентгенограммм Rigaku

Стоит отметить, что все пики оксидных и углеродных соединений с W, W-Cu, W-Zr, обработанных КПП на рисунке 6 имеют малую интенсивность относительно основной фазы W. Также, обработка КПП производилась в атмосфере азота. Таким образом, содержание подобных оксидов и карбидов мало, и возможно связано с диффузией углерода/кислорода и/или незначительным загрязнением образцов.

Таблица 2. Фазовый состав образцов W, W-Cu, W-Zr, обработанных КПП с плотностью энергии 55 Дж/см^2, а также исходного (необработанного) вольфрама ($W_{исх.}$) на основе рентгенограмм Rigaku

Система	Фазовый состав
$W_{исх.}$	W
W (КПП)	W, m-WO_2, c-W_3O, t-WO_3, h-WC
W-Cu (КПП)	W, c-Cu, c-W_3O, m-WO_2, h-W_2C, h-WC, triclinic-$CuWO_4$, t-WO_3
W-Zr (КПП)	W, c-ZrO_2, m-ZrO_2, t-ZrO_2, c-W_2Zr, c-ZrN, t-W_5Zr_3

На рисунке 6 в рентгенограмме системы W-Cu присутствуют пики чистой меди, что свидетельствует о неполном жидкофазном перемешивании вольфрама и меди. Для системы W-Zr с концентрацией Zr равной 34 ат.% обнаружено присутствие кубического W_2Zr (W0.67 Zr0.33), что соответствует диаграмме состояния системы W-Zr [26]. W_5Zr_3 может образоваться из-за диффузии Zr и волокон W [27]. Также были указаны возможные пики фазы ZrO_2, которая, например, наблюдалась при 1000 °C в сплаве W-11.2Cr-1.7Zr, где частицы ZrO_2 могут замедлять окисление сплава [22]. Таким образом, плазменная обработка, возможно, увеличит стойкость сплавов вольфрама к окислению. Пик ZrN (200) совпадает с соответствующей фазой, которая образуется в покрытиях из Zr-W-N [28]. Результаты качественного фазового анализа указанных образцов представлены в таблице 2.

Определение деформации решетки проводилось на основе анализа наиболее интенсивных рентгеновских пиков для плоскостей (110), (200) и (211), показанных на рисунке 7. Расчет деформации решетки проводился на основании изменения межплоскостных расстояний кристаллической решетки по отношению к необработанному исходному вольфраму:

$$\Delta d = d_{эксп} - d_0, \qquad (1)$$

где $d_{эксп}$ – экспериментально измеренное межплоскостное расстояние соответствующего образца, обработанного КПП, d_0 – межплоскостное расстояние исходного (необработанного КПП) вольфрама. Углы 2θ (центры тяжести), на которые приходились пики рентгеновской дифракции были получены в ходе анализа пиков рентгенограмм с использованием функции Гаусса. В качестве погрешности данных углов использовались стандартное отклонение, полученное в результате анализа. При определении микронапряжений σ (напряжений второго рода) в таблице 3 использовалась формула [29]:

$$\sigma = -\frac{E}{\nu} \cdot \frac{\Delta d}{d_0}, \qquad (2)$$

где σ – напряжение (ГПа), E – модуль Юнга (ГПа), ν – коэффициент Пуассона [30]. Модуль Юнга и коэффициент Пуассона для систем рассчитывались в зависимости от концентраций элементов.

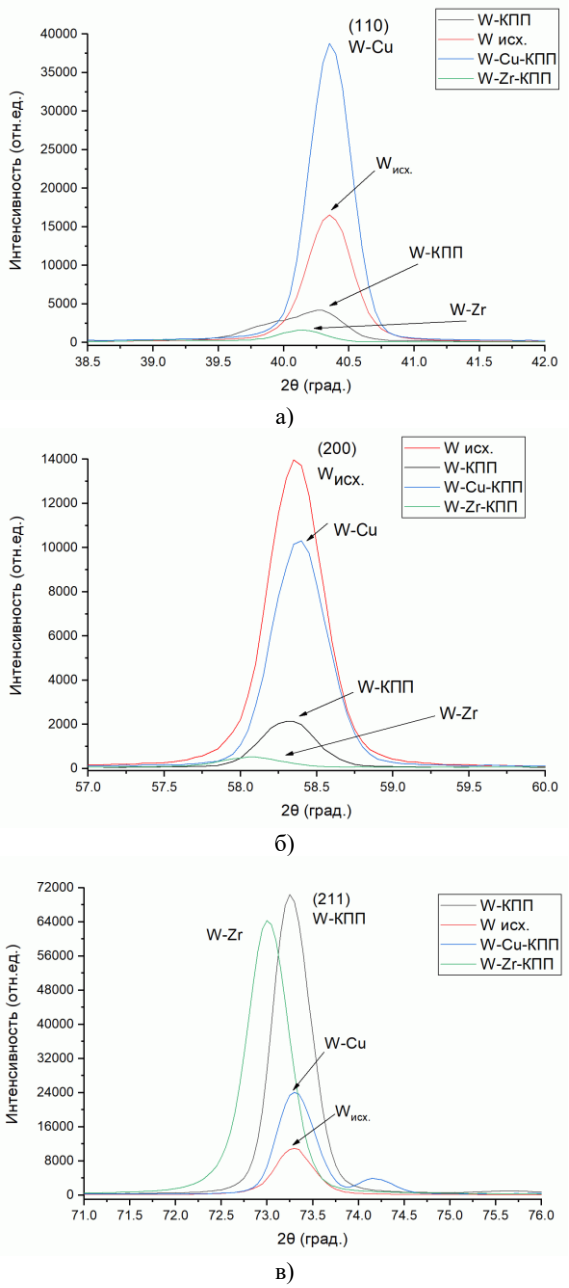


Рисунок 7. Участки рентгенограмм образцов $W_{исх.}$ и W, W-Cu, W-Zr, обработанных КПП с плотностью энергии 55 Дж/см^2, для плоскостей: (110) (а), (200) (б) и (211) (в), полученные из рентгенограмм Rigaku

В первой группе (R), при обработке компрессионными плазменными потоками (КПП) уровни деформации решетки и напряжений достигают наибольших значений в вольфраме и W-Zr. В приповерхностном слое W-КПП напряжения склоняются к растягивающим и достигают максимальных значений 6 ГПа, в то время как для системы легированной медью W-Cu напряжения ближе к сжимающим и стремятся к нулю. В W-Zr обнаружены наибольшие деформации, а напряжения склоняются к растягивающим, и их абсолютное значение достигает 5,12 ГПа. Изменения напряжений в вольфраме при обработке плазмой обычно связаны с быстрым изменением температуры поверхности и с радиационными дефектами [31]. Большие значения напряжений в образцах W, обработанных КПП, обусловлены высокими скоростями (порядка 10^7–10^8 К/с) закалки расплавленной приповерхностной области.

Согласно таблице 3, в обеих группах W, W-Cu, W-Zr, обработанных КПП в одинаковых условиях, деформации и напряжения имеют схожее поведение. В W-Zr (B) напряжения стремятся к растягивающим, имеют схожие значения с первой группой, а в W-Cu (B) напряжения стремятся к сжимающим, но уступают показателям в первой группе. Для рентгенограмм W-КПП (B), полученных с помощью дифрактометра Bruker, были рассчитаны значения деформации и напряжения только для плоскости (200), так как этот пик был наиболее интенсивным и четким. В W-КПП (B) напряжения отличаются и являются сжимающими.

Напряжения в W, W-Cu, W-Zr, обработанных КПП, имеют схожий порядок и растягивающий/сжимающий характер с результатами других исследований. При облучении вольфрама водородной плазмой с плотностью энергии 45 Дж/см^2, были обнаружены растягивающие напряжения до 800 МПа при комнатной температуре и до 600 МПа при 650 °C [31].

В пленках W-Cu (КПП) могут присутствовать сжимающие остаточные напряжения более 1,5 ГПа [32]. Но из таблицы 3 видно, что напряжения в W-Cu (КПП) ниже в абсолютном значении, чем в W-Zr-КПП и в W-КПП для обеих групп образцов, что возможно указывает на малый уровень напряжений W-Cu-КПП и может способствовать большей устойчивости W-Cu-КПП к образованию трещин [19].

Таблица 3. Деформация решетки ($\Delta d/d_0$) и микронапряжения (σ) в образцах W, W-Cu, W-Zr, обработанных КПП с плотностью поглощенной энергии 55 Дж/см^2. Расчет на основе рентгенограмм от дифрактометров: группа (R) – Rigaku, группа (B) – Bruker

	$\Delta d/d_0$, %			σ, ГПа		
Система/плоскость	**(110)**	**(200)**	**(211)**	**(110)**	**(200)**	**(211)**
W (R)	0,408±0,028	0,075±0,032	0,030±0,002	−6,00±0,17	−1,10±0,04	−0,44±0,001
W-Cu (R)	−0,016±0,002	−0,043±0,002	−0,024±0,002	0,22±0,001	0,58±0,001	0,32±0,001
W-Zr (R)	0,527±0,012	0,459±0,004	0,337±0,003	−5,12±0,06	−4,45±0,02	−3,27±0,01
W (B)	—	−0,092±0,008	—	—	1,35±0,01	—
W-Cu (B)	−0,142±0,014	−0,074±0,011	−0,090±0,009	1,93±0,03	1,01±0,01	1,22±0,01
W-Zr (B)	0,652±0,028	0,252±0,002	0,378±0,054	−6,32±0,18	−2,44±0,01	−3,66±0,20

В работе [33] в пленках W-Zr присутствовали остаточные растягивающие напряжения до 0,41 ГПа, но эти напряжения росли с концентрацией Zr и отсутствовало влияние нагрева подложки. В целом, напряжения в сплавах зависят от метода создания сплавов, их состава и могут варьироваться в зависимости от локальности измерений и способа их измерения. В будущем следует произвести анализ напряжений и другими методами, например методом Вильямсона-Холла [34] и $\sin^2\psi$ [35].

Разработанные вольфрамовые сплавы, обработанные КПП, обладают потенциалом для применения в различных высокотехнологичных областях. В термоядерной энергетике они могут использоваться для стенок реакторов, таких как ITER и DEMO, благодаря улучшенной радиационной стойкости, что обеспечивает их долговечность и надежность при экстремальных температурах и потоках нейтронов. В авиакосмической промышленности сплавы демонстрируют отличные характеристики при высоких температурах и давлениях, что делает их идеальными для ракетных двигателей и термозащитных экранов. В энергетике сплавы могут применяться для изготовления компонентов, работающих при экстремальных температурах, таких как турбины и теплообменники. Плазменная обработка улучшает микроструктуру сплавов, увеличивая их стойкость к радиационному повреждению, что особенно важно для условий высокого уровня нейтронного и ионного облучения. Предварительные испытания показывают улучшенные результаты по сравнению с традиционными вольфрамовыми сплавами, однако для окончательной оценки требуется проведение долгосрочных испытаний в реальных эксплуатационных условиях.

Заключение

В настоящем исследовании была предложена и изучена методика плазменного жидкофазного легирования приповерхностного слоя вольфрама атомами переходных металлов для повышения его радиационной стойкости и улучшения физико-механических свойств. Плазменное воздействие позволяет сформировать в приповерхностном слое сплав однородного состава, включающего в себя вольфрам и цирконий. Элементный состав указанных образцов был измерен с помощью метода ЭДС, а величины деформации кристаллической решетки ($\Delta d/d$) и остаточных напряжений (σ) определены методом рентгеновской дифракции.

Экспериментальные результаты показали, что при обработке вольфрама КПП уровень деформации решетки значительно возрастает, и в приповерхностном слое W напряжения являются растягивающими и достигают 6 ГПа. В случае системы легированной медью W-Cu напряжения ближе к сжимающим и стремятся к нулю, тогда как для W-Zr напряжения являются растягивающими, с максимальным значением около 6,32 ГПа. Высокие показатели напряжений в образцах W, подвергнутых КПП, связаны с высокими скоростями закалки расплавленной приповерхностной области.

Таким образом, введение нерастворимой примеси меди в вольфрам позволяет существенно снизить уровень остаточных внутренних напряжений, в отличие от включения циркония. Эти результаты подчеркивают потенциал плазменного жидкофазного легирования в улучшении эксплуатационных характеристик вольфрамовых сплавов, что открывает новые перспективы для их применения в термоядерной энергетике. Дальнейшие исследования в данном направлении, включая разработку новых сплавов и их детальное изучение, имеют огромный потенциал для прогресса в области термоядерной энергетики и радиационного материаловедения.

Финансирование

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP14872078).

Литература / References

1. Chektybayev B., Sadykov A., Batyrbekov E., Skakov M., Zarva D., Tazhibayeva I., Korovikov A., Kashikbayev Ye., Olkhovik D., Savkin V., Khvostenko P., Belbas I., Sergeyev D., Kavin A., Lee A., Pavlov V. Study of breakdown and plasma formation in the KTM tokamak with the massive conductive vacuum chamber // Fusion Engineering and Design. – 2021. – Vol. 163. – P. 112167.
2. Tokunaga K., Baldwin M.J., Doerner R.P., Noda N., Kubota Y., Yoshida N., Sogabe T., Kato T., Schedler B. Blister formation and deuterium retention on tungsten exposed to low energy and high flux deuterium plasma // Journal of Nuclear Materials. – 2005. – Vol. 337-339. – P. 887–891.
3. Yoshida N., Iwakiri H., Tokunaga K., Baba T. Impact of low energy helium irradiation on plasma facing metals // Journal of Nuclear Materials. – 2005. – Vol. 337-339. – P. 946–950.
4. Zenobia S.J., Kulcinski G.L. Retention and surface pore formation in helium implanted tungsten as a fusion first wall material // Fusion Science and Technology. – 2009. – Vol. 56. – P. 352–360.
5. Baldwin M.J., Doerner R.P. Formation of helium induced nanostructure ‘fuzz’ on various tungsten grades // Journal of Nuclear Materials. – 2010. – Vol. 404 (3). – P. 165–173.
6. Petty T.J., Baldwin M.J., Hasan M.I., Doerner R.P., Bradley J.W. Tungsten ‘fuzz’ growth re-examined: the dependence on ion fluence in non-erosive and erosive helium plasma // Nuclear Fusion. – 2015. – Vol. 55. – P. 093033.
7. Makarov P., Povarova K. Development of tungsten-based vacuum melted and powder structural alloys // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2002. – Vol. 20 (4). – P. 277–285.
8. Tanabe T., Eamchotchawalit C., Busabok C., Taweethavorn S., Fujitsuka M., Shikama T. Temperature dependence of thermal conductivity in W and W-Re alloys from 300 to 1000 K // Materials Letters. – 2003. – Vol. 57 (19). – P. 2950–2953.

9. Zayachuk Y., ‘t Hoen M.H.J., Zeijlmans van Emmichoven P.A., Terentyev D., Uytdenhouwen I., van Oost G. Surface modification of tungsten and tungsten-tantalum alloys exposed to high-flux deuterium plasma and its impact on deuterium retention // Nuclear Fusion. – 2013. – Vol. 53 (1). – P. 013013.
10. Rieth M., Armstrong D., Dafferner B., Heger S., Hoffmann A., Hoffmann M.-D., Jäntsch U., Kübel C., Materna-Morris E., Reiser J., Rohde M., Scherer T., Widak V., Zimmermann H. Tungsten as a structural material // Advances in Science and Technology. – 2010. – Vol. 73. – P. 11–21.
11. Terentyev D., Khvan T., You J.-H., Van Steenberge N. Development of chromium and chromium-tungsten alloy for the plasma facing components: Application of vacuum arc melting techniques // Journal of Nuclear Materials. – 2020. – Vol. 536. – P. 152204.
12. Pérez P., Monge M.A. Influence of 2 (wt%) titanium addition on the oxidation resistance of tungsten // Nuclear Materials and Energy. – 2022. – Vol. 31. – P. 101172.
13. Fu T., Cui K., Zhang Y., Wang J., Shen F., Yu L., Qie J., Zhang X. Oxidation protection of tungsten alloys for nuclear fusion applications: A comprehensive review // Journal of Alloys and Compounds. – 2021. – Vol. 884. – P. 161057.
14. Gao H., Chen W., Zhang Z. Evolution mechanisms of surface nano-crystallization of tungsten-copper alloys // Materials Letters. – 2016. – Vol. 176. – P. 181–184.
15. Zong R.L., Wen S.P., Zeng F., Gao Y., Pan F. Nanoindentation studies of Cu-W alloy films prepared by magnetron sputtering // Journal of Alloys and Compounds. – 2008. – Vol. 464 (1-2). – P. 544-549.
16. Zhang X., Beach J.A., Wang M., Bellon P., Averback R.S. Precipitation kinetics of dilute Cu-W alloys during low-temperature ion irradiation // Acta Materialia. – 2016. – Vol. 120. – P. 46-55.
17. Uglov V.V., Anishchik V.M., Astashynski V.V., Astashynski V.M., Ananin S.I., Askerko V.V., Kostyukevich E.A., Kuz’mitski A.M., Kvasov N.T., Danilyuk A.L. The Effect of Dense Compression Plasma Flow on Silicon Surface Morphology // Surface & Coatings Technology. – 2002. – Vol. 158. – P. 273-276.
18. Ryskulov A., Shymanski V., Uglov V., Ivanov I., Astashynski V., Amanzhulov B., Kuzmitski A., Kurakhmedov A., Filipp A., Ungarbayev Y., Koloberdin M. Structure and Phase Composition of WNb Alloy Formed by the Impact of Compression Plasma Flows // Materials. – 2023. – Vol. 16 (12). – P. 4445.
19. Wang Y., Zhuo L., Yin E. Progress, challenges and potentials/trends of tungsten-copper (W Cu) composites/pseudo-alloys: Fabrication, regulation and application // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2021. – Vol. 100. – P. 105648.
20. Shymanski V. I., Uglov V. V., Cherenda N. N., Pigasova V. S., Astashynski V. M., Kuzmitski A. M., Zhong H. W., Zhang S. J., Le X. Y., Remnev G. E. Structure and phase composition of tungsten alloys modified by compression plasma flows and high-intense pulsed ion beam impacts // Applied Surface Science. – 2019. – Vol. 491. – P. 43–52.
21. Kamiura Y., Umezawa K., Teraoka Y., Yoshigoe A. Characterization of Polycrystalline Tungsten Surfaces Irradiated with Nitrogen Ions by X-ray Photoelectron Spectroscopy // Mater. Trans. – 2016. – Vol. 57, No. 9. – P. 1609–1614.
22. Fu T., Cui K., Zhang Y., Wang J., Shen F., Yu L., Qie J., Zhang X. Oxidation protection of tungsten alloys for nuclear fusion applications: A comprehensive review // Journal of Alloys and Compounds. – 2021. – Vol. 884. – P. 161057.
23. Koch F., Bolt H. Self-passivating W-based alloys as plasma facing material for nuclear fusion // Phys. Scr. – 2007. – Vol. 128. – P. 100–105.
24. Tishkevich D. I., German S. A., Rotkovich A. A., Vershinina T. N., Zhaludkevich A. L., Yao Y., Silibin M. V., Razanau I. U., Zubar T. I., Bondaruk A. A., Sayyed M. I., Trukhanov A. V. Isostatic hot-pressed tungsten radiation shields against gamma radiation // Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – Vol. 30. – P. 4347–4352.
25. Baklanov V., Zhanbolatova G., Skakov M., Miniyazov A., Sokolov I., Tulenbergenov T., Kozhakhmetov Y., Bukina O., Orazgaliev N. Study of the temperature dependence of a carbidized layer formation on the tungsten surface under plasma irradiation // Mater. Res. Express. – 2022. – Vol. 9, No. 1. – P. 016403.
26. Franke P., Neuschütz D., Scientific Group Thermodata Europe (SGTE). W-Zr (Tungsten - Zirconium). In: Franke P., Neuschütz D. (eds) Binary Systems. Part 5: Binary Systems Supplement 1. Landolt-Börnstein – Group IV Physical Chemistry. – Vol. 19 (B5). – Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. – 390 p.
27. Jin H., Hu H., Chi J., Ma Y., Su X. Interface Characteristics of Tungsten-Particle-Reinforced Zr-Based Bulk-Metallic-Glass Composites with Different Tungsten Particle Sizes // Materials. – 2023. – Vol. 16, № 15. – P. 5212.
28. Dubey P., Arya V., Srivastava S., Singh D., Chandra R. Effect of nitrogen flow rate on structural and mechanical properties of Zirconium Tungsten Nitride (Zr–W–N) coatings deposited by magnetron sputtering // Surface and Coatings Technology. – 2013. – Vol. 236. – P. 182–187.
29. Cullity, B. D. Elements of X-Ray Diffraction / B.D. Cullity. Reading: Addison-Wesley Publishing, 1956. – 514 p.
30. Smithells Metals Reference Book/ ed. E. A. Brandes, G. B. Brook. England: Elsevier, Butterworth-Heinemann, 1992. – 7th ed. – 1800 p.
31. Makhlaj V. A., Garkusha I. E., Malykhin S. V., Pugachov A. T., Landman I., Linke J., Pestchanyi S., Chebotarev V. V., Tereshin V. I. Residual stresses in tungsten under exposures with ITER ELM-like plasma loads // Phys. Scr. – 2009. – Vol. T138. – P. 014060.
32. Girault B., Eyidi D., Chauveau T., Babonneau D., Renault P.-O., Le Bourhis E., Goudeau P. Copper coverage effect on tungsten crystallites texture development in W/Cu nanocomposite thin films // Journal of Applied Physics. – 2011. – Vol. 109, No. 1. – P. 014305.
33. Červená M., Čerstvý R., Dvořák T., Rezek J., Zeman P. Metastable structures in magnetron sputtered W–Zr thin-film alloys // Journal of Alloys and Compounds. – 2021. – Vol. 888. – P. 161558.
34. Mote V., Purushotham Y., Dole B. Williamson-Hall analysis in estimation of lattice strain in nanometer-sized ZnO particles // Journal of Theor. Applied Physics. – 2012. – Vol. 6, No. 1. – P. 6.
35. Baczmanski A., Lark R. J., Skrzypek S. J. Application of Non-linear Sin2ψ Method for Stress Determination Using X-Ray Diffraction Materials science forum. Coimbra, Portugal: Uetikon-Zuerich, Switzerland: Trans Tech Publications. – 2002. – P. 29–34.

ПЛАЗМАЛЫҚ СҰЙЫҚ ФАЗАЛЫҚ ҚОСПАЛАУДЫҢ ВОЛЬФРАМ ҚОРЫТПАЛАРЫНЫҢ ФИЗИКАЛЫҚ ЖӘНЕ МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ЫҚПАЛЫ

А. Е. Рысқұлов[1], Б. С. Аманжулов[1,2*], И. А. Иванов[1,2], В. В. Углов[3], С. В. Злоцкий[3], Ә. М. Темір[1,2], А. Е. Курахмедов[1,2], Ә. Д. Сапар[1,2], Е. О. Оңғарбаев[1, 2], М. В. Колобердин[1, 2]

[1] ҚР ЭМ «Ядролық физика институты» РМК, Алматы, Қазақстан
[2] КЕАҚ «Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті», Астана, Қазақстан
[3] Беларусь мемлекеттік университеті, Минск, Беларусь Республикасы

** Байланыс үшін E-mail: amanzholovb96@gmail.com*

Бұл зерттеу вольфрамның және оның қорытпаларының беткі қабатының физикалық-механикалық қасиеттеріне плазмалық сұйық фазалық қоспалаудың әсерін зерттеуге арналған. Мыс және цирконий жабыны бар вольфрамның тәжірибелік үлгілері компрессиялық плазмалық ағындармен (КПА) өңделген. Үлгілердің элементтік құрамы энергодисперсиялық рентгендік спектроскопия (ЭДС) арқылы анықталды, ал тордың деформациясы мен қалдықтық кернеулері рентгендік дифракция әдісі арқылы бағаланды. ЭДС нәтижелері плазмалық әсерден бетке жақын қабатта вольфрам мен цирконийдің біртекті қорытпасының пайда болуын көрсетті. Вольфрамды КПА көмегімен өңдеу тордың деформациясын үлкейтеді. W-КПА-ның беткі қабатында, 6 ГПа-ге жететін созу кернеулерінің пайда болуы анықталды, ал мыспен қоспаланған W-Cu жүйесінде нөлге жақын қысу кернеулері байқалды. W-Zr жүйесі үшін максималды созу кернеулері 5–6 ГПа-ге жетеді. Вольфрамды мыспен қоспалау циркониймен қоспаланумен салыстырғанда қалдықтық ішкі кернеулердің деңгейін айтарлықтай төмендететіні анықталды. Алынған нәтижелер термоядролық энергетикада және басқа салаларда пайдалану үшін жақсартылған сипаттамалары бар жаңа вольфрам қорытпаларының дамуына ықпал етуі мүмкін.

Түйін сөздер: *вольфрам қорытпалары, радиацияға төзімділік, компрессиялық плазмалық ағындар, плазмалық сұйық фазалық қоспалау, қалдықтық механикалық кернеу, рентгендік дифракция.*

INFLUENCE OF PLASMA LIQUID-PHASE ALLOYING ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF TUNGSTEN ALLOYS

A. E Ryskulov[1], B. S. Amanzhulov[1,2*], I. A. Ivanov[1,2], V. V. Uglov[3], S. V. Zlotsky[3], A.M. Temir[1,2], A. E. Kurakhmedov[1,2], A. D. Sapar[1,2], Y. O. Ungarbayev[1, 2], M. V. Koloberdin[1, 2]

[1] RSE «Institute of Nuclear Physics» ME RK, Almaty, Kazakhstan
[2] NJSC «L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana», Kazakhstan
[3] Belarusian State University, Minsk, the Republic of Belarus

** E-mail for contacts: amanzholovb96@gmail.com*

This study is devoted to studying the influence of plasma liquid-phase alloying on the physical and mechanical properties of the surface layer of tungsten and its alloys. Experimental samples of tungsten with copper and zirconium coatings were exposed to compression plasma flows (CPF). The elemental composition of the samples was determined by energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), and lattice deformation and residual stresses were assessed using X-ray diffraction. The results of EDS showed that plasma exposure leads to the formation of a homogeneous alloy of tungsten and zirconium in a near-surface layer. Treatment of tungsten by CPF causes an increase in the level of lattice deformation. In the surface layer of W-CPF tensile stresses with a value up to 6 GPa were observed, while for the system alloyed with copper W-Cu, compressive stresses tending to zero were observed. For the W-Zr system, the maximum tensile stresses reached around 5–6 GPa. It has been established that the introduction of copper into tungsten significantly reduces the level of residual internal stresses compared to alloying with zirconium. The results obtained may contribute to the development of new tungsten alloys with improved performance characteristics for use in fusion energy and other fields.

Keywords: *tungsten alloys, radiation resistance, compression plasma flows, plasma liquid-phase alloying, residual mechanical stresses, x-ray diffraction.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-115-122
УДК 621.039.6: 533.9.08: 621.039.66

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ВОЛЬФРАМА ПОСЛЕ КАРБИДИЗАЦИИ В ППР

И. А. Соколов[1,2], А. Ж. Миниязов[1], Г. К. Жанболатова[1*], Т. Р. Туленбергенов[1,2], Н. М. Мухамедова[1], А. Ж. Кайырбекова[1], А. А. Агатанова[1]

[1] Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан
[2] НАО «Университет имени Шакарима города Семей», Семей, Казахстан

** E-mail для контактов: kaiyrdy@nnc.kz*

Данная работа посвящена исследованию влияния смешанных слоев *W–C* на изменение морфологии поверхности и структурно-фазовых состояний поверхностного слоя вольфрама при воздействии *D* плазмы. Эксперименты по карбидизации и плазменному облучению проведены на плазменно-пучковой установке (ППУ) при различных энергиях ионов и температурах поверхности. В качестве рабочего газа при карбидизации использовался метан (CH_4), при плазменном облучении – дейтерий (*D*). Воздействие *D* плазмы с энергией ионов 1 кэВ на поверхность вольфрама со смешанными слоями привело к полному разрушению карбидных соединений при температуре ~1750 °С и дальнейшей эрозии вольфрама. Однако, при температуре ~900 °С смешанные слои на основе двух фаз (*WC* и W_2C) обладают высоким сопротивлением дейтериевому воздействию.

Ключевые слова: *вольфрам, карбид вольфрама, плазма, дейтерий, облучение.*

Введение

Как известно, вольфрам (*W*) выбран в качестве плазмообращенного материала дивертора ИТЭР ввиду высокой температуры плавления, хорошей теплопроводности, очень высокого порога распыления под действием частиц плазмы и малого захвата трития [1]. Тем не менее, при воздействии плазмы на *W* происходит модификация его поверхности посредством ионной бомбардировки, включая распыление материала, отражение, имплантацию и удержание (диффузия и захват) ионов. Нагрев же поверхности *W* в основном происходит электронами из плазмы. Следовательно, дивертор будет подвергаться интенсивному плазменно-тепловому воздействию с энергией изотопов водорода (*H, D, T*) от нескольких эВ до нескольких кэВ с небольшим количеством ионов гелия (*He*) в диапазоне энергий МэВ [2]. Необходимо отметить, что в токамаках вследствие конструкционных особенностей и выбора плазмообращенных материалов присутствуют примеси углерода (*C*) [3–5], которые приводят к образованию смешанных слоев *W–C* в виде карбидов вольфрама (*WC*, W_2C) [4–7]. Карбидизированный слой на поверхности вольфрама может действовать как диффузионный барьер и играть важную роль в изменениях морфологии поверхности вольфрама, а также в захвате, удержании и диффузии ионов гелия и изотопов водорода [8]. Поэтому исследование влияния смешанных слоев *W–C* на поверхности вольфрама на его физико-механические свойства и структурно-фазовое состояние при взаимодействии с *D* плазмой является важной задачей.

Ранее нами был разработан способ карбидизации поверхности вольфрама в пучково-плазменном разряде (ППР) и получены экспериментальные данные по исследованию процесса поверхностной карбидизации вольфрама в зависимости от длительности и температуры [9–12]. В качестве рабочего газа при зажигании ППР использовался метан. Разложение метана в результате взаимодействия с электронным пучком позволяет моделировать условия локального переноса атомов углерода вдоль смачиваемых плазмой поверхностей за счет углеводородов. Результаты работ по исследованию взаимодействия гелиевой плазмы со смешанными слоями W-C показали, что на поверхности вольфрама ускоряется образование коралловой структуры при низких температурах облучения и существенно изменяется морфология поверхности вольфрама [13].

В настоящей работе мы приводим результаты экспериментальных работ по исследованию влияния смешанных слоев *W-C* на изменение морфологии поверхности и структурно-фазовых состояний поверхностного слоя вольфрама при воздействии *D* плазмы.

Материалы и методы исследования

Карбидизация поверхности вольфрама в ППР и плазменное облучение проводились на ППУ. ППУ представляет собой источник стационарной плазмы с продольным магнитным полем, в котором для генерации плазмы используется ППР. Плазма образуется в результате взаимодействия электронного пучка с рабочим газом, подаваемым в разрядную камеру. Подробное описание установки представлено в работах [9, 14, 15]. Параметры плазмы измеряются электрическим зондом Ленгмюра, размещенным на расстоянии 3–5 мм от мишенного узла и перемещающимся в радиальном направлении оси ППР.

Для проведения экспериментов были подготовлены образцы в виде дисков Ø10×2±0,1 мм из вольфрамового прутка марки High purity (99,99%). Облучаемая сторона всех заготовок подвергалась механической шлифовке и полировке до степени шероховатости Ra = 0,02 мкм.

Таблица 1. Параметры проведения экспериментов по карбидизации и результаты полуколичественной оценки содержания фаз

Образец	Температура, ±10 °C	Длительность, с	Ток ионов, мА	Результаты полуколичественной оценки содержания фаз		
				WC (гекс., P-6m2)	W_2C (орт., Pbcn)	W_2C (гекс., P-31m)
3-*WC*	1500	3600	≤60	82	18	—
4-*WC*				81	—	19
5-W_2C	1700	1200	≥120	22	—	78
6-W_2C				18	—	82

Перед проведением экспериментов по карбидизации образцы вольфрама отжигали на ППУ в режиме нагрева электронным пучком. Температура поверхности при отжиге составляла 1350±20 °C, длительность – 3600 с. Давление в камере взаимодействия во время отжига составляло $(1{,}60\pm0{,}03)\cdot10^{-3}$ Па. Для измерения температуры с тыльной стороны образца устанавливалась термопара, а контроль температуры облучаемой поверхности осуществлялся пирометром.

Эксперименты по карбидизации были проведены согласно ранее разработанному способу [9, 10]. Условия проведения карбидизации и результаты полуколичественной оценки содержания фаз в образцах представлены в таблице 1. Давление газа в экспериментальной камере и энергия ионов метана были постоянными и составили $\sim(1{,}08–1{,}20)\cdot10^{-1}$ Па и 500 эВ, соответственно.

Выбор данных условий основывался на результатах экспериментов, раннее проведенных в работах [9–12]. Образцы были промаркированы в соответствии с фазовым составом смешанных слоев *W–C* (3-*WC*, 4-*WC*, 5-W_2C, 6-W_2C). Для сравнительного анализа в перечень исследуемых образцов были включены образцы без карбидизированного слоя на поверхности (1-*W* и 2-*W*).

Изучение структурно-фазовых превращений в приповерхностных слоях вольфрама производилось методом рентгенофазового анализа с углом 2θ в диапазоне 25–80° с использованием *Cu Ka*-излучения (λ = 1,54184 Å). Для идентификации фазового состава образцов вольфрама использовали базу данных Crystallography Open Database и базу данных PDF-2 ICDD Release 2004 [16].

Для исследования влияния смешанных слоев *W-C* на изменение морфологии поверхности и структурно-фазовых состояний поверхностного слоя вольфрама при воздействии *D* плазмы необходимо было обеспечить достаточно высокий флюенс ионов *D*. На ППУ для накопления флюенса ионов *D* на уровне $1{,}06\cdot10^{24}$–$1{,}65\cdot10^{25}$ м$^{-2}$ экспозиция образцов в плазме длилась в течение 3600 с. Были выбраны значения температуры поверхности образцов 900 °C и 1750 °C, которые соответствуют тепловым потокам в ИТЭР ~10 МВт/м^2 стационарно и ~20 МВт/м^2 импульсно, согласно ранее проведенным расчетам [17]. При этом плотность плазмы для экспериментов при разных температурах поверхности составила $N_{e\ 900°C} = 5{,}89\cdot10^{17}$ м$^{-3}$, $N_{e\ 1750°C} = 9{,}13\cdot10^{17}$ м$^{-3}$, а электронная температура – $T_{e\ 900°C} = 8{,}8$ эВ, $T_{e\ 1750°C} = 1{,}8$ эВ. Энергия ионов *D* определялась потенциалом смещения, который поддерживался на уровне $U_{см} = -1000$ В. На рисунке 1 показан процесс облучения образцов вольфрама *D* плазмой.

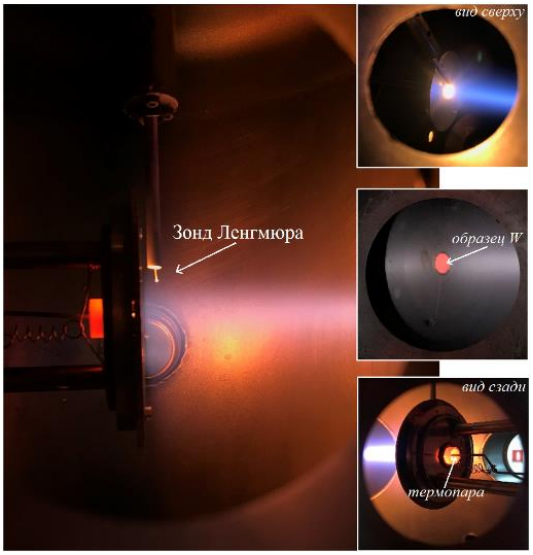


Рисунок 1. Процесс облучения W образца D плазмой

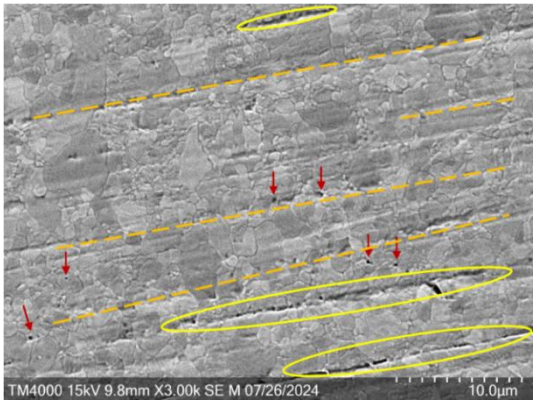
Анализ микроструктуры поверхности образцов вольфрама до и после воздействия D плазмы проводился методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборах Hitachi TM 4000 с приставкой энергодисперсионного спектрального анализа Bruker и Tescan Vega 3 с приставкой энергодисперсионного спектрального анализа X-Act.

Результаты и обсуждение

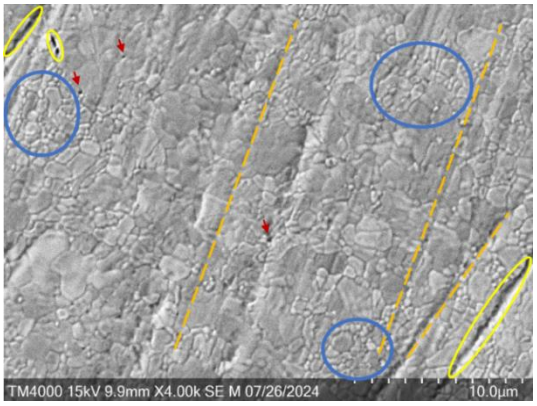
Морфология поверхности образцов чистого *W* и *W* со смешанными слоями до и после воздействия *D* плазмы при разных температурах представлена на рисунках 2, 3, 5. На рисунке 2 представлена морфология поверхности образцов чистого *W* после воздействия *D* плазмы.

Поверхности образцов 1-*W*, 2-*W* после облучения дейтериевой плазмой имеют типичный вид *W* подвергнутого рекристаллизационному отжигу [18, 19]. На поверхности наблюдаются следы механической полировки, царапины и поверхностные дефекты (отмечены пунктирной линией). Вдоль направления следов механической полировки наблюдаются трещ-

ины (отмечено зелеными кружками). Можно предположить, что при облучении плазмой в поверхности развиваются напряжения, приводящие к растрескиванию поверхностных дефектов и углублению их. Местами на поверхности образцов можно наблюдать микроскопические поры (отмечены красными стрелками), которые образовались независимо от температуры облучения. Образование глубоких трещин можно также объяснить тем, что тесно расположенные поры, сливаясь друг с другом, образовали каналы по границам зерен. Согласно [19] на поверхности образца 2-*W* наблюдается микроструктура, характерная для процессов собирательной и вторичной стадий рекристаллизации. Можно заметить, что зародыши рекристаллизации появляются в основном по границам зерен (отмечено синими кружками). Отсутствие на поверхности данных образцов стандартного блистерного поведения вероятно связано с низким потоком ионов, который в данной работе равен $2{,}95\cdot10^{21}$ м$^{-2}$с$^{-1}$ (900 °С) и $4{,}57\cdot10^{21}$ м$^{-2}$с$^{-1}$ (1750 °С), и их высокой энергией. Согласно современным источникам, обычно, образование пузырей на поверхности вольфрама, наблюдается только при экспериментах по имплантации низкоэнергетической плазмой дейтерия с потоком более 10^{22} м$^{-2}$с$^{-1}$.



а)



б)

Рисунок 2. Микроструктура поверхности образцов после воздействия D плазмы: 1-W, облучение D плазмой при температуре 905±10 °С (а) и 2-W, облучение D плазмой при температуре 1749±10 °С (б)

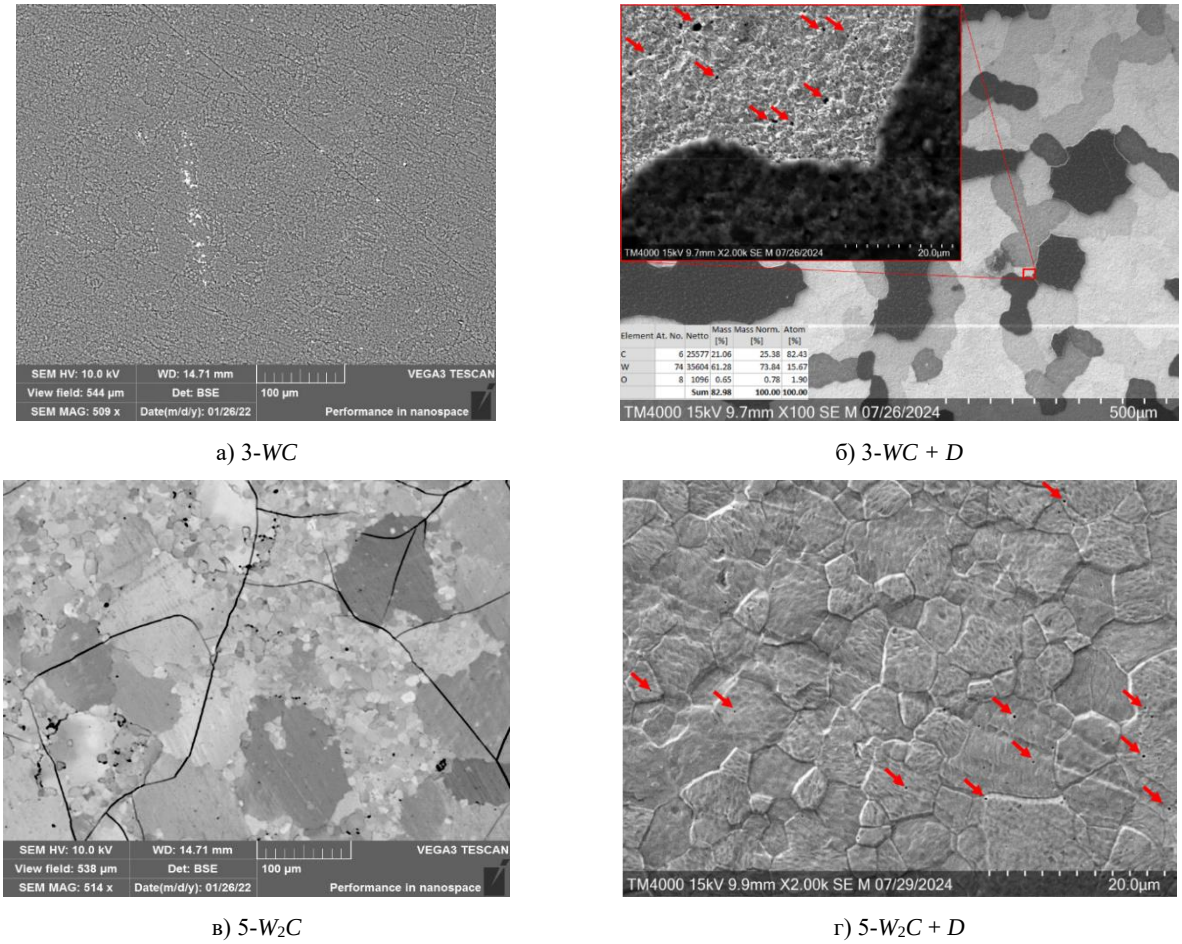
Микроструктура поверхности образцов вольфрама со смешанными слоями в виде *WC*, W_2C до и после воздействия *D* плазмы при температуре 900±10 °С представлена на рисунке 3. Известно, что в термоядерных реакторах, использующих в качестве плазмообращенных материалов *C* и *W*, при переосаждении примесей *C* образуются смешанные слои *W–C* с четкими границами между *W*, смешанным слоем *W–C* и осажденным *C* в виде покрытия [20, 21]. В то же время предыдущие наши результаты [10] свидетельствуют о сильной зависимости осажденных слоев (как углеродных, так и смешанных слоев) от температуры поверхности образцов вольфрама. Поверхность образца 3-*WC* до и после хорошо это иллюстрирует. До облучения, как видно на рисунке 3, а, поверхность образца 3-*WC* покрыта сплошным слоем с высоким содержанием углерода (до 90 ат.%). После воздействия *D* плазмы на поверхности образца 3-*WC* (рисунок 3, б) наблюдаются области отслоения и частичного разрушения образованной углеродной пленки, что говорит о ее относительно низкой температурной стабильности. Данные элементного анализа (таблица 1) свидетельствуют о том, что под разрушенной углеродной пленкой атомы *C* находятся в связанном виде. Поверхности образцов после облучения относительно целые, трещин на границах зерен или в зернах не наблюдается.

Таблица 1. Результаты элементного анализа поверхности образцов после карбидизации

Наименование	*C*, ат.%	*O*, ат.%	*W*, ат.%
3-*WC*	96,89	0,76	2,35
3-*WC* + *D*	25,38	0,78	73,84
5-W_2C	28,10	12,97	59,93
5-W_2C + *D*	33,60	3,13	63,27

Как видно из рисунка 3, в, поверхность образца 5-W_2C характеризуется ярко выраженной зеренной структурой и отсутствием углеродной пленки. Однако на поверхности образцов наблюдается большое количество трещин. При этом распространение трещин на поверхности покрытия носит разносторонний характер. Наблюдается наличие как протяженных трещин, так и коротких локальных трещин. Результаты элементного анализа, приведенные в таблице 1, свидетельствуют о том, что углерод на поверхности образцов присутствует уже в химической связанном виде, образуя фазы карбидов вольфрама.

На поверхности образца 5-W_2C (рисунок 3, г) после облучения дейтериевой плазмой наблюдаются четко выраженные зерна с перепадом высот. На поверхности образцов 3-*WC*, 5-W_2C характерных следов (блистеры, отшелушивание или флекинг) взаимодействия дейтерия с приповрехностными слоями не наблюдается. Однако, после облучения можно наблюдать наличие пор (отмечены красными стрелками на рисунках 3, б и 3, г). Размеры и формы пор отличаются в зависимости от вида смешанного слоя.



а) 3-*WC* б) 3-*WC* + *D*

в) 5-W_2C г) 5-W_2C + *D*

Рисунок 3. Микроструктура поверхности образцов вольфрама с карбидизированной поверхностью до (а, в) и после (б, г) воздействия D плазмы (900±10 °C)

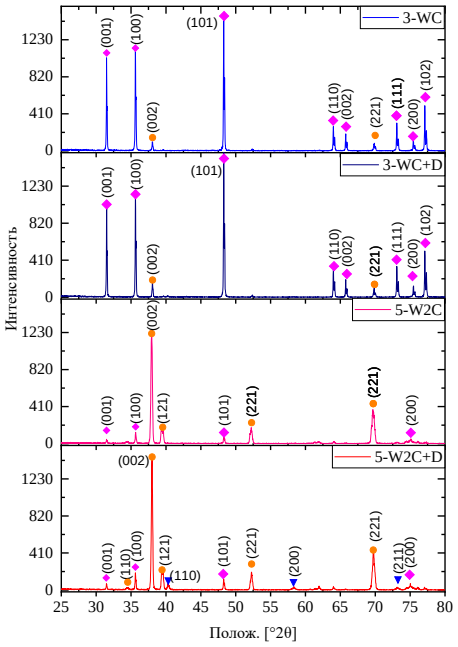


Рисунок 4. Дифрактограммы исследованных образцов до и после воздействия D плазмы при температуре 900±10 °C (▼ – W, ◆ – WC, ● – W_2C)

Согласно результатам рентгенофазового анализа (рисунок 4) после облучения образца 3-*WC* основой фазового состава остается карбид вольфрама *WC*, характеризующийся гексагональной кристаллической решеткой, пространственная группа P-6m2, параметры решетки a=b=2,9065 Å, c=2,9366 Å. Пики с низкими интенсивностями идентифицированы как гексагональная модификация полукарбида вольфрама W_2C (пространственная группа P-31m).

Основой фазового состава образца 5-W_2C остается фаза W_2C орторомбической сингонии. Однако после плазменного облучения заметно увеличение интенсивности пиков, принадлежащих фазе W_2C, и наблюдаются пики малой интенсивности, принадлежащие *W*.

Микроструктура поверхности образцов вольфрама со смешанными слоями в виде *WC*, W_2C до и после воздействия *D* плазмы при температуре 1750±10 °C представлена на рисунке 5. Поверхность образцов 4-*WC* и 6-W_2C до облучения характеризуется наличием развитой морфологии с выраженной зеренной структурой. Однако на поверхности образца 4-*WC* заметны участки углеродной пленки после разрушения и отслоения. Как было отмечено ранее, по характеру раз-

рушения углеродная пленка хрупкая и имеет низкую адгезию с поверхностью подложки.

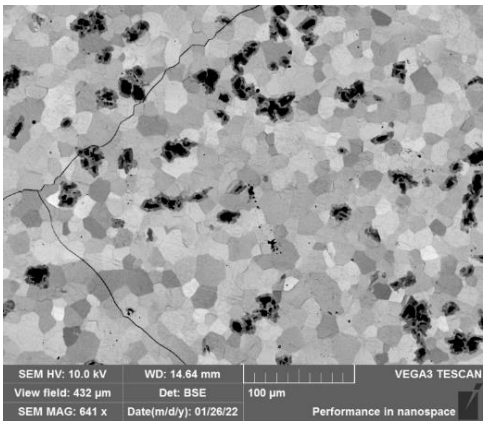
Главной особенностью образцов после облучения является рельеф, несхожий с образцами 1-*W*, 2-*W* без смешанного слоя, и отсутствие протяженных трещин по всей поверхности, которые были распределены в основном по границам зерен вольфрама (рисунок 5, а, в). Отсутствие трещин может быть объяснено распылением вольфрама высокоэнергичными ионами *D* при высокой температуре облучения. После облучения при высокой температуре на поверхности наблюдается высокая концентрация субмикронных пор, также наблюдаются области слияния тесно расположенных пор (отмечено голубыми кружочками на рисунке 5, б). Из теории [22] следует, что поры чаще появляются вдоль границ зерен и различных дефектов, в результате рекристаллизационных процессов в материале. При облучении поверхности ионами *D* концентрация легко диффундирующих атомов в приповерхностном слое возрастает и, как следствие, возрастает поток атомов газа в зародившиеся поры и их размеры увеличиваются [22]. Распыление поверхностного слоя приводит к выходу пор на поверхность. Кроме того, выход на поверхность пор происходит в результате диффузии пор под действием ионно-индуцированных напряжений в приповерхностном слое образца.

На рисунке 6 представлен график изменения массы образцов после облучения.

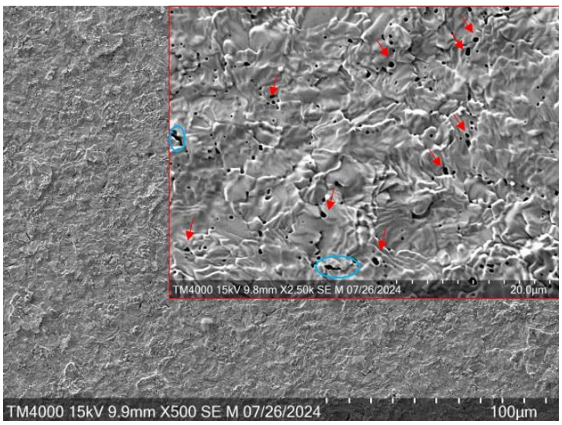
Как видно из рисунка 6, масса образцов 4-*WC* и 6-W_2C после воздействия воздействия *D* плазмы снижается, что свидетельствует о распылении образцов при высокой температуре облучения и высокой энергии. После воздействия *D* плазмы при высокой температуре на поверхности образцов также наблюдаются области, характерные пластической деформации путем скольжения (отмечены оранжевымы кружками на рисунке 5, г), причиной образования которых может быть высокая температура облучения и высокая энергия ионов *D*.

Распыление поверхности в результате воздействия *D* плазмы подтверждают и результаты рентгеноструктурного анализа, приведенного на рисунке 7.

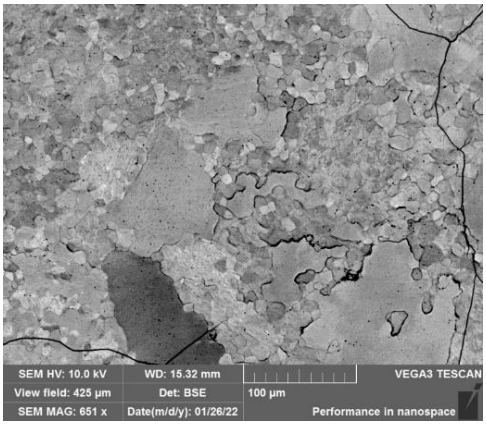
После облучения дейтериевой плазмой основой фазового состава образцов 4-*WC* и 6-W_2C становится фаза металлического вольфрама, пиков других фаз на дифрактограмме не наблюдается.



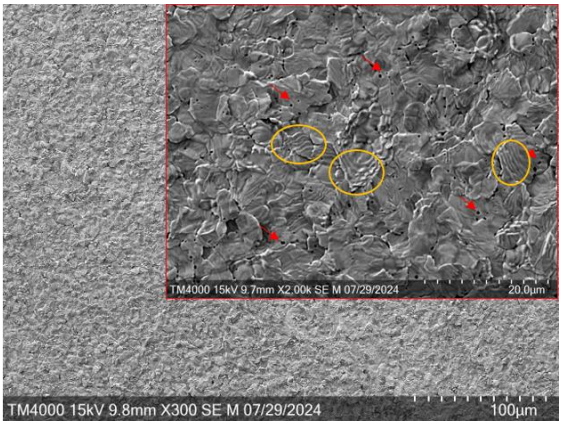
а) 4-*WC*



б) 4-*WC* + *D*



в) 6-W_2C



г) 6-W_2C + *D*

Рисунок 5. Микроструктура поверхности образцов вольфрама с карбидизированной поверхностью до (а, в) и после (б, г) воздействия D плазмы (1750±10 ℃)

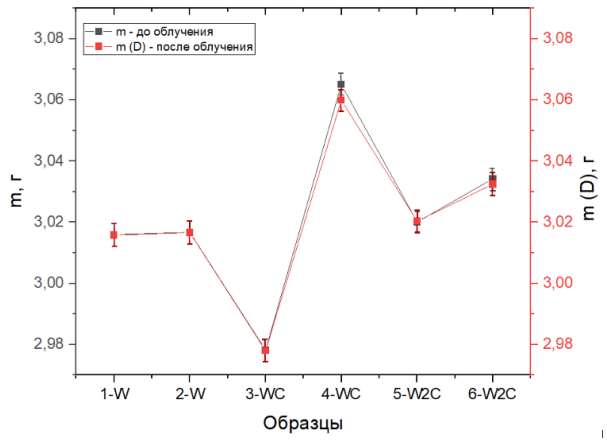


Рисунок 6. График изменения массы образцов

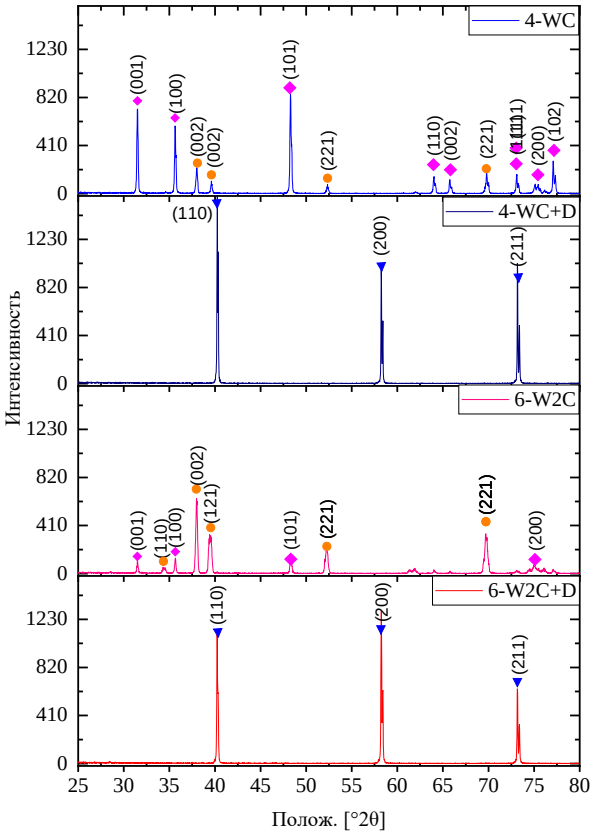


Рисунок 7. Дифрактограммы исследованных образцов до и после воздействия D плазмы при температуре 1749±10 °C (▼ – W, ◆ – WC, ● – W_2C)

Согласно работам [23–24], смешанные слои *W-C* имеют более высокий коэффициент распыления, чем чистый *W*. Авторы полагают, что эрозия карбидов вольфрама в основном вызвана преимущественным физическим распылением атомов *C* под действием высокоэнергичных ионов *D* из-за большой разницы масс между атомами *W* и *C*, а также низкой энергии связи *W-C*, что отмечают в работе [25]. Важную роль в распылении также имеет температура поверхности образца при облучении.

Выводы

Проведены эксперименты по исследованию влияния смешанных слоев *W–C* на изменение морфологии поверхности и структурно-фазовых состояний поверхностного слоя вольфрама при воздействии *D* плазмы. Эксперименты осуществлялись при расчетных температурах ~900 °C и ~1750 °C, для имитации тепловых потоков в диверторе термоядерного реактора ИТЭР ~10 МВт/м^2 и ~20 МВт/м^2, соответственно. Выполнена оценка концентрации, электронной температуры, потока ионов и флюенса ионов дейтерия при облучении вольфрама.

По результатм микроструктурного анализа установлено, что после воздействия *D* плазмы с энергией ионов 1 кэВ на образцы вольфрама со смешанными слоями W–C в виде карбидов вольфрама (*WC*, W_2C) характерных следов (блистеры, отшелушивание или флекинг) взаймодействия дейтерия с приповрехностными слоями вольфрама независимо от температуры облучения не наблюдается. Однако наличие смешанных слоев приводит к образованию субмикронных пор, которые сливаясь друг с другом, образовывают каналы по границам зерен. При температуре ~900 °C карбидизированные слои на основе двух фаз (*WC* и W_2C) имеют высокое сопротивление дейтериевому воздействию, что подтверждается минимальными изменениями в фазовом составе. Воздействие *D* плазмы на поверхность вольфрама со смешанными слоями при температуре ~1750 °C привело к полному разрушению карбидных соединений и дальнейшей эрозии вольфрама. Это свидетельствует о том, что при экстремальных термических нагрузках наличие смешанных слоев приведет к распылению плазмообращенных материалов и образованию пыли.

Таким образом, результаты исследования говорят о важности контроля температурных режимов и морфологических изменений при взаимодействии дейтериевой плазмы с поверхностью вольфрама со смешанными слоями в виде карбидов вольфрама. Полученные результаты являются ценным вкладом в понимание взаимодействия плазмы с карбидизированной поверхностью вольфрама и могут быть использованы для оптимизации технологий, используемых в термоядерных установках и исследовательских токамаках, а также на разработку новых подходов к улучшению эксплуатационных характеристик конструкционных материалов в условиях плазменных воздействий.

Работа выполнена в Национальном ядерном центре Республики Казахстан в рамках научно-технической программы №BR23891779 по теме «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на Казахстанском материаловедческом токамаке КТМ».

Литература / References

1. Pintsuk G., Hasegawa A. 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. Bolt H., Barabash V., Federici G. et al. (2002). Plasma facing and high heat flux materials-needs for ITER and beyond // Journal of Nuclear Materials. – 2002. – Vol. 307. – P. 43.
3. Mayer M. et al. Tungsten erosion and redeposition in the all-tungsten divertor of ASDEX Upgrade // Physica scripta. – 2009. – T. 138. https://doi.org/10.1088/0031-8949/2009/T138/014039
4. Ueda Y., Schmid K., Balden M. et al. Baseline high heat flux and plasma facing materials for fusion // Nucl. Fusion. – 2017. – Vol. 57. – P. 092006. https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa6b60
5. Budaev V.P., Fedorovich S.D., Dedov A.V., et.al. High-heat flux tests of tungsten divertor mock-ups with steady-state plasma and e-beam // Nuclear Materials and Energy. – 2020. – Vol. 25. https://doi.org/10.1016/j.nme.2020.100816
6. Muhammad Luqman Khalid et al. (2019) // Mater. Res. Express. – 2019. – Vol. 6. – P. 066551. https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab087f
7. Rubel M, Philipps V, Huber A, and Tanabe T. Formation of carbon containing layers on tungsten test limiters // Physica Scripta. – 1999. – T. 81. – P. 61–63.
8. Ueda Y., et al. Carbon impurity behavior on plasma facing surface of tungsten // Fusion Engineering and Design. – 2006. – Vol. 81. – P. 233–239.
9. Жанболатова Ғ.Қ., Бакланов В.В., Туленбергенов Т.Р., Миниязов А.Ж., Соколов И.А. Карбидизация поверхности вольфрама в пучково-плазменном разряде // Вестник НЯЦ РК. – 2020. – Вып. 4. – С. 77–81. [G. K. Zhanbolatova, V. V. Baklanov, T. R. Tulenbergenov, A. Zh. Miniyazov, I. A. Sokolov Carbidization of the tungsten surface in a beam-plasma discharge // NNC RK Bulletin. – 2020. – Issue 4. – P. 77–81.] (In Russ.)
10. Baklanov V., Zhanbolatova G., Skakov M., et al. Study of the Temperature Dependence of a Carbidized Layer Formation on the Tungsten Surface Under Plasma Irradiation // Materials Research Express. – 2022. – Vol. 9. – P. 016403. https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac4626
11. Жанболатова Ғ.Қ., Миниязов А.Ж., Туленбергенов Т.Р., Соколов И.А., Букина О.С. Исследование карбидизации поверхности вольфрама при плазменном облучении // Вестник НЯЦ РК.– 2021. – Вып. 3. – С. 37–43. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-3-37-43 [Zhanbolatova G.K., Miniyazov A.Z., Tulenbergenov T.R., Sokolov I.A., Bukina O.S. Investigation of tungsten surface carbidization under plasma irradiation // NNC RK Bulletin. – 2021. Issue 3. – P. 37–43.] (In Russ)
12. Skakov M.K., Baklanov V.V., Zhanbolatova G.K., Miniyazov A.Zh., Kozhakhmetov Ye.A., Gradoboev A.V. Research of the structural-phase state of tungsten surface layer cross-section after carbidization in a beam-plasma discharge usage electron microscopy methods // NNC RK Bulletin. – 2023. – Issue 2. – P. 89–96. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-2-89-96
13. Skakov M.K., Miniyazov A.Z., Batyrbekov E.G, et al. Influence of the Carbidized Tungsten Surface on the Processes of Interaction with Helium Plasma // Materials. – 2022. – Vol. 15. – P. 7821. https://doi.org/10.3390/ma15217821
14. Патент РК на полезную модель № 2080. Имитационный стенд с плазменно-пучковой установкой / Колодешников А.А., Зуев В.А., Гановичев Д.А., и др. – опубл. 15.03.2017, Бюл. № 5. [Patent RK na poleznuyu model' № 2080. Imitatsionnyy stend s plazmenno-puchkovoy ustanovkoy / Kolodeshnikov A.A., Zuev V.A., Ganovichev D.A., i dr. – opubl. 15.03.2017, Byul. No. 5.] (In Russ.)
15. Туленбергенов Т.Р., Скаков М.К., Миниязов А.Ж., Соколов И.А., Кайырды Г.К. // Роль имитационного стенда с плазменно-пучковой установкой в исследованиях плазменно-поверхностного взаимодействия // Вестник НЯЦ РК. – 2019. – Вып. 4. – С. 51–58. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2019-4-51-58 [Tulenbergenov T.R., Skakov M.K., Miniyazov A.Zh., Sokolov I.A., Kayyrdy G.K. The role of a simulation bench with plasma- beam installation in researches of plasma-surface interection // NNC RK Bulletin. – 2019. – Issue 4. – P. 51–58.] (In Russ.)
16. S. Gražulis, D. Chateigner, R. T. Downs, A. F. T. Yokochi, et.al. Crystallography Open Database – an open-access collection of crystal structures // J. Appl. Cryst. – 2009. – Vol. 42. – P. 726–729.
17. Skakov Mazhyn, Zhanbolatova Gainiya, Miniyazov Arman, Tulenbergenov Timur, Sokolov Igor, Sapatayev Yerzhan, Kozhakhmetov Yernat, Bukina Olga. Impact of High-Power Heat Load and W Surface Carbidization on its Structural-Phase Composition and Properties // Fusion Science and Technology. – 2021. – Vol. 77. – P. 57–66. https://doi.org/10.1080/15361055.2020.1843885
18. Skakov M.K., Baklanov V.V., Zhanbolatova G.K., et al. The effect of recrystallization annealing on the tungsten surface carbidization in a beam plasma discharge // AIMS Materials Science. – Vol. 10(3). – P. 541–555.
19. Горелик С. С., Добаткин С. В., Капуткина Л. М. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: МИСИС, 2005. 432 с. [Gorelik S. S., Dobatkin S. V., Kaputkina L. M. Rekristallizatsiya metallov i splavov. – Moscow: MISIS. – 2005. – 432 p.]
20. Maier, H., Rasinski, M., von Toussaint, U., Greuner, H., Böswirth, B., Balden, M. Kinetics of carbide formation in the molybdenum–tungsten coatings used in the ITER-like Wall // Physica Scripta. – 2016. – T. 167. – P. 014048. https://doi.org/10.1088/0031-8949/t167/1/014048
21. Linsmeier Ch., Reinelt M., Schmid K. Surface chemistry of first wall materials – from fundamental data to modeling // Journal of Nuclear Materials. – 2011. – Vol. 415. – Issue 1. – P. S212–S218. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2010.08.056
22. Беграмбеков Л.Б. Процессы в твердом теле под действием ионного и плазменного облучения: Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2008. – 196 с. [Begrambekov L.B. Protsessy v tverdom tele pod deystviem ionnogo i plazmennogo oblucheniya: Uchebnoe posobie. – Moscow: MIFI. – 2008. – 196 p.] (In Russ)
23. Tu H., Li C., Shi L. The erosion and retention properties of α-WC films by low-energy deuterium ion irradiation // Applied Surface Science. – 2023. – Vol. 608. – P. 155133.
24. P. Jenus et al. Deuterium retention in tungsten, tungsten carbide and tungsten-ditungsten carbide composites // Journal of Nuclear Materials. – 2023. – Vol. 581. – P. 154455.
25. Z. Zhao, F. Liu, L. Cao, et al. Investigation of indentation response, scratch resistance, and wear behavior of tungsten carbide coatings fabricated by two-step interstitial carburization on tungsten // Ceramics International. – 2021. – Vol. 47. – P. 30636–30647.

СӘУЛЕЛІК-ПЛАЗМАЛЫҚ РАЗРЯДТА КАРБИДТЕНГЕННЕН КЕЙІНГІ ВОЛЬФРАМ БЕТТІМЕН ДЕЙТЕРИЙ ПЛАЗМАСЫНЫҢ ӨЗАРА ӘРЕКЕТТЕСУІ

И. А. Соколов[1,2], А. Ж. Миниязов[1], Ғ. Қ. Жанболатова[1*], Т. Р. Туленбергенов[1,2], Н. М. Мухамедова[1], Ә. Ж. Қайырбекова[1], А. А. Агатанова[1]

[1] ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан
[2] «Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті» КЕАҚ, Семей, Қазақстан

** Байланыс үшін E-mail: kaiyrdy@nnc.kz*

Берілген жұмыс дейтерии плазмасының әсеріне ұшыраған кездегі вольфрамның беткі қабатының беткі морфологиясы мен құрылымдық-фазалық күйлерінің өзгеруіне аралас *W–C* қабаттарының әсерін зерттеуге арналған. Карбидизация және плазмалық сәулелендіру бойынша тәжірибелер әртүрлі иондық энергиялар мен бет температураларында плазмалық щоқтық қондырғыда (ПШҚ) жүргізілді. Карбидизация кезінде жұмыс газы ретінде метан (CH_4), ал плазманы сәулелендіру кезінде дейтерий пайдаланылды. 500 эВ иондық энергиясы бар *D* плазмасының аралас қабаттары бар вольфрам бетіне әсер етуі ~1750 °С температурада карбидті қосылыстардың толық жойылуына және вольфрамның одан әрі эрозиясына әкелді. Дегенмен, ~900 °С температурада екі фазаға негізделген аралас қабаттар (*WC* және W_2C) дейтерий әсеріне жоғары төзімділікке ие, бұл фаза мөлшерінің шамалы өзгеруімен дәлелденеді.

Түйін сөздер: *вольфрам, вольфрам карбиді, плазма, дейтерий, сәулелену.*

INTERACTION OF DEUTERIUM PLASMA WITH A TUNGSTEN SURFACE AFTER CARBIDIZATION IN THE BPD

I. A. Sokolov[1,2], A. Zh. Miniyazov[1], G. K. Zhanbolatova[1*], T. R. Tulenbergenov[1,2], N. M. Mukhamedova[1], A. Zh. Kaiyrbekova[1], A. A. Agatanova [1]

[1] RSE NNC RK Branch "Institute of Atomic Energy", Kurchatov, Kazakhstan
[2] NPJSC "University named after Shakarim of Semey", Semey, Kazakhstan

** E-mail for contacts: kaiyrdy@nnc.kz*

This work is devoted to studying the effect of mixed *W–C* layers on the change in the surface morphology and structural-phase states of the tungsten surface layer under the influence of *D* plasma. Experiments on carbidization and plasma irradiation were carried out on a plasma-beam installation (PBI) at different ion energies and surface temperatures. Methane (CH_4) was used as a working gas during carbidization, and deuterium was used for plasma irradiation. The effect of *D* plasma with an ion energy of 500 eV on the tungsten surface with mixed layers led to the destruction of carbide compounds at a temperature of ~1750 °C and further erosion of tungsten. However, at a temperature of ~900 °C, mixed layers based on two phases (*WC* and W_2C) have a high resistance to deuterium action, as evidenced by an insignificant change in the phase content.

Keywords: *tungsten, tungsten carbide, plasma, deuterium, irradiation.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-123-128
УДК 661.961.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕРСИИ МЕТАНА В СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОМ РАЗРЯДЕ

М. К. Скаков[1], Т. Р. Туленбергенов[2,3], И. А. Соколов[2,3], А. Ж. Миниязов[2], А. А. Агатанова[2,3*]

[1] РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, Казахстан
[2] Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан
[3] НАО «Университет имени Шакарима города Семей», Семей, Казахстан

** E-mail для контактов: agatanova@nnc.kz*

В данной работе представлены результаты экспериментов по получению водорода с помощью пиролиза метана с применением сверхвысокочастотного (СВЧ) разряда на установке для прикладных исследований ПМ-6. Впервые получены результаты экспериментов по влиянию параметров установки (мощность СВЧ-разряда, соотношение газов) на эффективность конверсии природного газа в водород. Реализована технология получения водорода с использованием СВЧ-разряда с максимальной степенью конверсии метана до 82% и селективностью водорода до 15%. Результаты проведенных исследований получения водорода из метана в среде аргона с использованием СВЧ-разряда могут быть использованы в экспериментах по разложению метана с применением катализаторов для улучшения эффективности процесса разложения.

Ключевые слова: *пиролиз, сверхвысокочастотный разряд, конверсия метана, углерод, селективность водорода.*

Введение

Выброс парниковых газов в атмосферу из-за непрерывного сжигания ископаемого топлива представляет серьезную угрозу глобального изменения климата. На сегодняшний день экологически безопасным кандидатом в качестве топлива является водород. Главная трудность использования водорода в качестве топлива считается его отсутствие в природе в чистом виде, поскольку он активно формирует ковалентные связи с другими атомами [1]. Таким образом, необходимо развивать экологически чистые и экономически выгодные методы получения водорода.

В зависимости от используемого сырья доступны широко распространённые методы получения водорода, такие как электролиз воды, пиролиз метана, паровая конверсия углеводородов, газификация угля и т.д. [2–3]. На данный момент в качестве сырья, для получения водорода, рассматриваются вода, уголь, нефть, природный газ и биомасса. В результате стоимость водорода формируется из следующих затрат: метод получения, стоимость и качеством сырья, суммы капитальных и эксплуатационных затрат на производство, объемы и условия поставок. Например, стоимость «зеленого» водорода обходится значительно дороже, чем производство «серого» водорода – получаемого из ископаемого топлива, т.к. для получения водорода таким методом нужна электрическая энергия. В результате КПД производства водорода электролизом воды составляет меньше 50%. В свою очередь, недостаток получения водорода из природного топлива – это выбросы в атмосферу большого количества диоксида углерода. Утилизация данного газа требует значительных капитальных и эксплуатационных расходов, тем самым существенно повышая стоимость конечного продукта. В литературе было предложено множество решений, с целью получения водорода различными методами [4–8], которые позволяют преодолеть технические, экономические и экологические трудности для масштабного применения водорода как энергоносителя.

В настоящее время многочисленные исследования нацелены на изучение производства водорода путем расщепления природного газа без выделения в атмосферу вредных веществ. Например, получение водорода пиролизом метана с использованием возобновляемых источников энергии является экологически чистым методом. Расширение масштабов применения таких реакторов, увеличение их производительности и эффективности остается важной задачей. В связи с этим, пиролиз метана постепенно получает широкое промышленное применение. На сегодняшний день компания *Monolith Inc*. известна как первая компания по производству водорода и углерода пиролизом метана [9]. С 2012 года данная компания занимается производством водорода, аммиака и углеродной сажи в промышленном масштабе. Компания [10] также применяет технологию пиролиза метана, а углерод используют в качестве сырья в разных отраслях промышленности. Твёрдый углерод, полученный в результате разложения метана, может негативно влиять на процесс, но имеет применение в промышленности.

Твердый углерод нетоксичен, его легко хранить и применять в других отраслях. Например, можно использовать для получения синтетического графита, графена, фуллеренов, углеродных нанотрубок и применять в машиностроении и т.д. Помимо этого, применение углерода в электронике имеет огромный потенциал, т.к. он идеальный проводник, который может переносить электроны гораздо быстрее, чем

кремний. Таким образом, доходы от углерода могут снизить себестоимость производства водорода [11].

В коммерческих фирмах активно разрабатываются способы предотвращения накопления углерода в реакторах. Например, в компании [12] разработан импульсный реактор с повышенным потоком газа, в котором накопление углерода снижается турбулентностью. Также, в [13] используется дополнительное органическое вещество для активации образования углеродных нанотрубок. Это предотвращает отложение сажи на стенках реактора в виде нанодисперсного углерода.

Исследование процесса плазмохимического разложения метана является актуальной темой в научно-исследовательских работах, т.к. реакция пиролиза считается сложным процессом. Для разрыва химической связи между молекулами углерода и водорода необходимо большое количество энергии $\Delta H = +74{,}9$ кДж/моль [14]. Использование микроволновой энергии для генерации плазмы оказывается эффективным, доступным и относительно дешевым способом. По данным из литературы при конверсии метана с помощью СВЧ-разряда наблюдаются минимальные энергозатраты (0,9–1 эВ/мол) при степени разложения до 90% [15, 16]. В то время как в дуговом разряде энергозатраты составляют 14,3 эВ/моль [17]. Помимо этого, главным отличием пиролиза метана в СВЧ-разряде по сравнению с устоявшимися методами является:

− высокая энергоэффективность системы за счет высоких температур;

− высокая концентрация активных частиц в плазме (радикалов, возбужденных молекул, ионов), которая позволяет значительно увеличить скорость химической реакции [18].

Учитывая результаты предыдущих экспериментов на установке для прикладных исследований ПМ-6, в котором селективность водорода оценивалась всего 4–5% [19], задача данного исследования является определение условий максимальной степени конверсии метана и селективности водорода с применением сверхвысокочастотного разряда. Эксперименты были проведены на установке, разработанной в филиале «Институт атомной энергии» Национального ядерного центра Республики Казахстан.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ

Экспериментальная установка для изучения плазмохимического разложения метана в сверхвысокочастотном разряде показана на рисунке 1. Основу установки составляет СВЧ-генератор – магнетрон частотой 2,45 ГГц с прямоугольным волноводом WR340 (сечением 275×98×138 мм), реакционная камера (кварцевая трубка ⌀27 мм) и сферическая аналитическая камера (⌀450 мм).

Схема установки ПМ-6 представлена на рисунке 2. Принцип работы установки заключается в следующем. Микроволны с максимальной мощностью до 6 кВт генерируются в магнетроне и распространяются по системе волновода. Перпендикулярно волноводу расположена реакционная камера (рисунок 2).



Рисунок 1. Внешний вид установки для прикладных исследований ПМ-6

Использование трубки из кварца в качестве реакционной камеры объясняется высокой температурой плавления, устойчивостью к коррозии и механической стабильностью в суровых эксплуатационных условиях. Подача смеси рабочих газов осуществляется с вихревым потоком из системы газоподачи в кварцевую трубку. Такой напуск помогает стабилизировать плазму в центре реакционной трубки и предотвращает быстрый нагрев стенок кварцевой камеры. Таким образом, вихревой напуск газов защищает трубку от горячей плазмы, поскольку температура в процессе разложения метана может достигать до 1700–1800 °C. Область плазмохимической реакции разложения метана является зона пересечения смеси газов с микроволнами в волноводе.

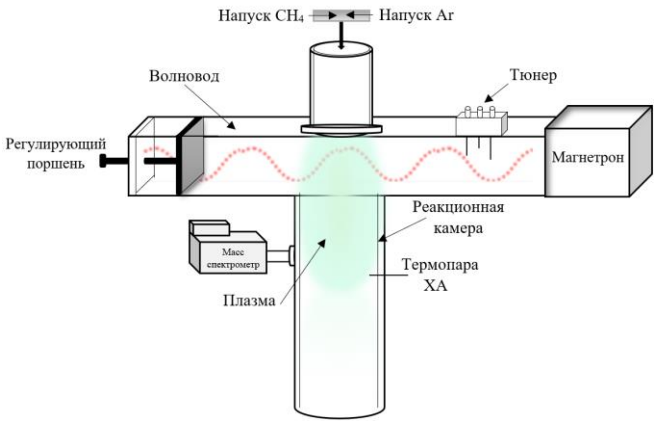
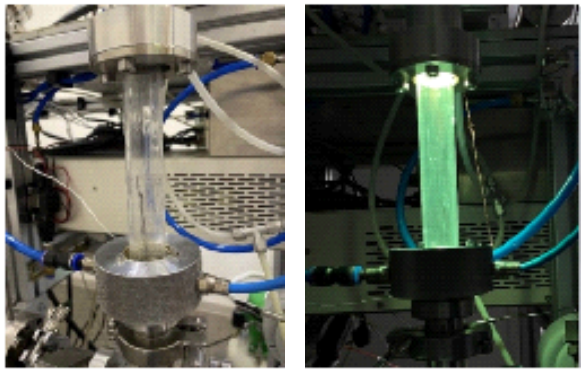


Рисунок 2. Схема установки ПМ-6

Температура газа в реакционной камере измерялась с помощью термопары типа ХА. Однако, из-за эффекта отражения микроволн СВЧ-излучения с поверхности металла термопары, температура плазмохимической реакции была измерена на 18±3 см ниже зоны формирования разряда. Состав газов, выходящий из «горячей зоны», был исследован с помощью масс – спектрометра CIS 100.

Аргон применялся в качестве плазмообразующего газа СВЧ-разряда. Затем в реакционную камеру подавался метан. Плазма с использованием смеси рабочих газов аргона и метана имела зеленый цвет (рисунок 3, б). Для анализа влияния количества метана Q_{CH4} и мощности СВЧ-генератора $W_{СВЧ}$ на степень конверсии метана были выбраны несколько значений расхода метана и параметров источника питания СВЧ, при которых наблюдается стабильный разряд. Расход аргона был одинаковым во всех экспериментах (Q_{Ar} = 21±1 л/мин). Углерод, осажденный на внутренних стенках реакционной камеры, затрудняет реакцию разложения в СВЧ-разряде, поскольку твердый углерод поглощает часть мощности от генератора СВЧ-излучения. На рисунке 3 показана реакционная камера установки перед зажиганием разряда, во время генерации СВЧ-плазмы и после осаждения углерода на внутренних стенках кварцевой трубки в результате пиролиза.



а) б)



в)

Рисунок 3. Реакционная камера: до эксперимента (а); во время эксперимента по конверсии метана (б); с осажденным углеродом после эксперимента (в)

Поскольку между кварцевым стеклом и углеродом нет химической связи, нанодисперсный порошок из углерода, осевший на стенке кварцевой трубки, механически отбирался и был собран для анализа после каждого эксперимента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ продуктов реакции проводился с помощью масс-спектрометра по парциальным давлениям газов. В процессе конверсии парциальное давление метана газа должно уменьшаться, а парциальные давления продуктов разложения – увеличиваться. Данный факт был подтвержден результатами масс-спектрометрического анализа. Диаграмма парциальных давлений газов представлена на рисунке 4, где $P_{H_2}(in)$ и $P_{CH_4}(in)$ – парциальные давления водорода и метана в начале эксперимента, $P_{H_2}(out)$ и $P_{CH_4}(out)$ – парциальные давления водорода и метана в конце эксперимента.

Подробный механизм пиролиза сложен и в настоящее время до конца не изучен. Однако, разложение метана происходит по схеме Касселя [20, 21]. Соответственно, ацетилен является промежуточным продуктом для полной диссоциации молекул метана, который образуется при температуре от 700 °C [22]. Данное утверждение подтверждается масс-спектрометрическим анализом. Таким образом, результаты свидетельствуют о разложении метана на основные газообразные продукты – водород и ацетилен.

На основе данных масс-спектрометрического анализа была выполнена качественная оценка степени разложения метана и селективности водорода.

Степень конверсии метана – качественная величина, которая определяет долю метана, вступившего в химическую реакцию от общего исходного метана. Степень конверсии метана была рассчитана по следующей формуле:

$$K_{CH_4} = \frac{P_{CH_4}(in) - P_{CH_4}(out)}{P_{CH_4}(in)} \cdot 100\% . \qquad (1)$$

Селективность продукта – качественная оценка, которая определяет какая доля метана из химической реакции переходит на образование целевого продукта, т.е. водорода. В данной работе селективность водорода была рассчитана по формуле:

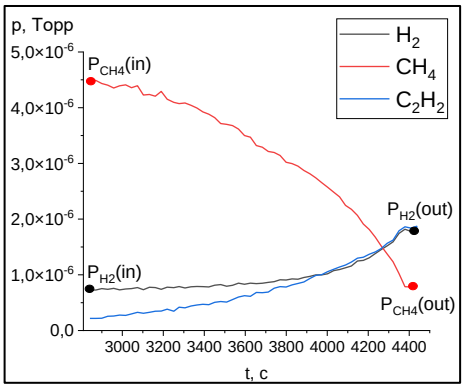
$$S_{H_2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{H_2}(out) - P_{H_2}(in)}{P_{CH_4}(in) - P_{CH_4}(out)} \cdot 100\% . \qquad (2)$$

На рисунке 5 представлена диаграмма зависимостей степени конверсии метана и селективности водорода от рабочих параметров (мощность СВЧ-источника и расход газов).

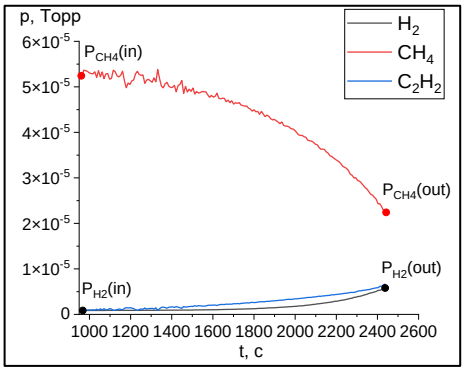
Проведенные эксперименты по изучению влияния параметров установки на степень конверсии метана позволяют выделить следующие наблюдения:

– расход аргона не влияет на конечный химический состав продукции, поскольку инертные газы не

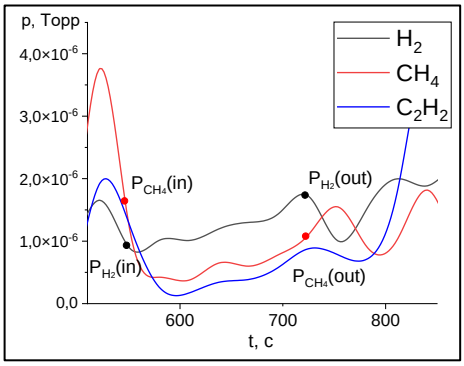
вступают в химическую реакцию. Однако, концентрация аргона влияет на протекание плазмохимического разложения. Данное явление известно в литературе как эффект Пеннинга [23]. Повышение концентрации аргона в реакционной камере увеличивает вероятность столкновения между молекулами аргона и энергичными электронами для преобразования аргона в его метастабильное состояние, что приводит к более высокой степени конверсии метана.



а) WСВЧ = 0,6 кВт; QCH4 = 0,145 л/мин.



б) WСВЧ = 0,6 кВт; QCH4 = 0,442 л/мин.



в) WСВЧ = 1,8 кВт; QCH4 = 0,58 л/мин.

Рисунок 4. Диаграмма парциальных давлений газов в результате разложения метана с различными параметрами

– увеличение концентрации аргона в общем потоке газов может привести к сокращению времени пребывания метана в зоне взаимодействия с СВЧ-разрядом. Следовательно, уменьшается вероятность столкновения молекул газа метана с химически активными частицами аргона, что уменьшает степень конверсии метана.

– увеличение расхода аргона снижает общий выход твердого углерода из-за уменьшения времени пребывания продуктов разложения в плазме;

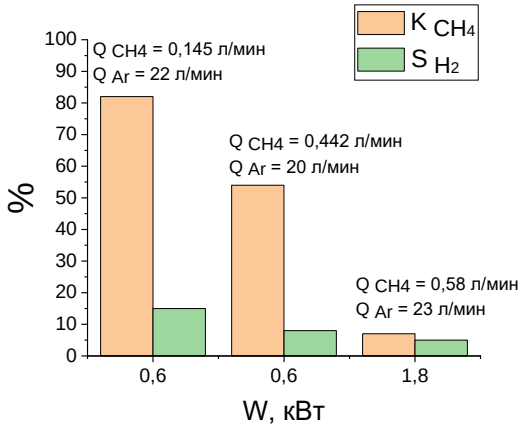


Рисунок 5. Диаграмма зависимостей степени разложения метана и селективности водорода от мощности магнетрона СВЧ-разряда и расхода газов

– при более низких уровнях мощности генератора магнетрона, снижение концентрации метана (при фиксированном расходе аргона) приводит к стабильности разряда и увеличению концентрации образующегося водорода. Таким образом, для каждого значения мощности СВЧ-магнетрона необходимо подбирать правильное соотношение газов, при котором разряд будет стабильным и повысит степень разложения метана;

– повышение мощности генератора СВЧ-излучения с целью увеличения степени конверсии метана не эффективно из-за высокого энергопотребления.

Заключение

В рамках данной работы выполнены эксперименты по получению водорода с помощью пиролиза метана в сверхвысокочастотном разряде на установке для прикладных исследований ПМ-6. Представлены результаты экспериментов по влиянию параметров установки (мощность СВЧ-разряда и соотношения газов) на степень конверсии метана. Установлено, что повышение мощности СВЧ-магнетрона не приводит к увеличению степени конверсии метана и селективности водорода. Также, увеличение объемного расхода метана не способствует увеличению концентрации целевого продукта – водорода. Эксперименты показали, что правильное соотношение газов является одним из важных факторов, влияющих на разложение метана при выборе значений мощности магнетрона. С увеличением расхода аргона возрастает возможность образования реактивных частиц, однако, с другой стороны, количество этих реактивных частиц

прямо пропорционально мощности СВЧ-разряда, которая задается генератором магнетрона [24].

На основании вышеизложенного, реализована технология получения водорода с использованием СВЧ-разряда с максимальной степенью конверсии метана до 82% и селективностью водорода до 15% при мощности СВЧ-разряда 0,6 кВт и расходе метана 0,145 л/мин.

Улучшить энергоэффективность можно используя металлические или углеродные катализаторы. Применения катализатора значительно уменьшает потребляемую энергию.

Благодарность

Работа выполнена в рамках программно-целевого финансирования Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № BR21882200).

Литература / References

1. K. Kapdan, F. Kargi, Bio-hydrogen production from waste materials, Enzyme and Microbial Technology, vol. 38(5), p.p. 569–582, 2006; https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2005.09.015
2. W. Cheng, S. Lee, How Green Are the National Hydrogen Strategies? // Sustainability. – 2022. – Vol. 14(3). – P. 1930. https://doi.org/10.3390/su14031930
3. A. Neacsa, C.N. Eparu, D.B. Stoica, Hydrogen – Natural Gas Blending in Distribution Systems // An Energy, Economic, and Environmental Assessment / Energies. – 2022. – Vol. 15. – P. 6143. https://doi.org/10.3390/en15176143
4. IRENA, Hydrogen: A renewable energy perspective // International Renewable Energy Agency. – Abu Dhabi. – 2019.
5. M. Momirlan, T.N. Veziroglu The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet // International Journal of Hydrogen Energy. – 2005. – Vol. 30(7). – P. 795–802. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.10.011
6. J. Andrews, B. Shabani, Where does hydrogen fit in a sustainable energy economy? // Procedia Engineering. – 2012. – Vol. 49. – P. 15–25. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.10.107
7. T.S. Uyar, D. Besikci, Integration of hydrogen energy systems into renewable energy systems for better design of 100% renewable energy communities // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. Vol. 42(4). – P. 2453–2456. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.086
8. B. Gaudernack, S. Lynum, Hydrogen from natural gas without release of CO_2 to the atmosphere // International Journal of Hydrogen Energy. – 1998. – Vol. 23(12). – P. 1087–1093. https://doi.org/10.1016/S0360-3199(98)00004-4.
9. Company *Carbonblack Monolith Inc.* [online], https://carbonblack.monolith-corp.com/
10. Company *Modern Hydrogen Inc.* [online], https://modernhydrogen.com/
11. S. Timmerberga, M. Kaltschmitta, M. Finkbeiner, Hydrogen and hydrogen-derived fuels through methane decomposition of natural gas– GHG emissions and costs // Energy Conversion and Management: X. – 2020. – Vol. 7. – P. 100043. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100043
12. Company *Ekona Power Inc.* [online], https://www.ekonapower.com
13. *Huntsman-NMG* Corporation [online], https://www.huntsman.com.
14. R. M. Navarro, M. A. Peña, and J. L. G. Fierro, Hydrogen Production Reactions from Carbon Feedstocks: Fossil Fuels and Biomass // Chemical Reviews. – 2007. – Vol. 107(10). – P. 3952–3991. https://doi.org/10.1021/cr0501994
15. Радиоволновой контроль: учеб. пособие / Матвеев В. И.; Рос. о-во по неразрушающему контролю и технической диагностике; общ. ред. Клюев В. В. – М.: Спектр. – 2011. [Radiovolnovoy kontrol': ucheb. posobie / Matveev V. I.; Ros. o-vo po nerazrushayushchemu kontrolyu i tekhnicheskoy diagnostike; obshch. red. Klyuev V. V. – Moscow: Spektr. – 2011.] (In Russ.)
16. I. Rusu, J. Cormier, A. Khacef, Hydrogen production from simple compounds via Plasma reactors, Social Science Research Network, Science Direct Working Paper No S1574-0331(04)70527-5, Available at SSRN: https://ssrn.com/abstract=2969569.
17. A. Czernichowski, P. Czernichowski, Pyrolysis of natural gas in the gliding electric discharges, 10th Canadian Hydrogen Conference, 2000.
18. S. Ravasio, C. Cavallotti, Analysis of reactivity and energy efficiency of methane conversion through non thermal plasmas // Chemical Engineering Science. – 2012. – Vol. 84. – P. 580–590. https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.09.012.
19. M. Skakov, A. Miniyazov, T. Tulenbergenov, I. Sokolov, G. Zhanbolatova, A. Kaiyrbekova, A. Agatanova. Hydrogen production by methane pyrolysis in the microwave discharge plasma // AIMS Energy. – 2024. – Vol. 12(3). – P. 548–560. https://doi.org/10.3934/energy.2024026.
20. L. S. Kassel, The Role of Methyl and Methylene Radicals in the Decomposition of Methane // Journal of the American Chemical Society. – 1935. – Vol. 57(5). – P. 833–834. https://doi.org/10.1021/ja01308a013
21. L. S. Kassel, The thermal decomposition of methane // Journal of the American Chemical Society. – 1932. – Vol. 54(10). – P. 3949–3961. https://doi.org/10.1021/ja01349a019
22. В.А. Богомолов, А.П. Кожан, О.Б. Бондаренко, А.И. Ховавк, К.В. Семейко, Механизм пиролиза метана // Энерготехнологии и энергосбережение. – 2013. – № 3. [V.A. Bogomolov, A.P. Kozhan, O.B. Bondarenko, A.I. Khovavk, K.V. Semeyko, Mekhanizm piroliza metana // Energotekhnologii i energosberezhenie. – 2013. – No. 3.] (In Russ.)
23. Б. М. Смирнов, Атомные столкновения и элементарные процессы в плазме, – М.: Атомиздат. – 1968. – 363 с. [B. M. Smirnov, Atomnye stolknoveniya i elementarnye protsessy v plazme, – Moscow: Atomizdat. – 1968. – 363 p.] (In Russ.)
24. O. Khalifeh, H. Taghvaei, A. Mosallanejad, M. R. Rahimpour, A. Shariati, Extra pure hydrogen production through methane decomposition using nanosecond pulsed plasma and Pt–Re catalyst // Chemical Engineering Journal. – 2016. – Vol. 294. – P. 132–145. https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.02.077

ЭКСПЕРИМЕНТАЛДЫ ЗЕРТТЕУ МЕТАНДЫ ЖОҒАРҒЫ ЖИІЛІКТІ РАЗРЯДТА КОНВЕРСИЯЛАУ

М. К. Скаков[1], Т. Р. Туленбергенов[2,3], И. А. Соколов[2,3], А. Ж. Миниязов[2], А. А. Агатанова[2,3*]

[1] Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығы РМК, Курчатов, Қазақстан
[2] ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан
[3] «Шәкәрім атындағы Семей университеті» КЕАҚ, Семей, Қазақстан

** Байланыс үшін E-mail: agatanova@nnc.kz*

Бұл жұмыста ПМ-6 қолданбалы зерттеулер қондырғысында жоғары жиілікті (ЖЖ) разрядты пайдалана отырып, метан пиролизі арқылы сутегін алудың эксперименттік нәтижелері көрсетілген. Табиғи газды сутегіне конверсиялаудың тиімділігіне қондырғы параметрлерінің (ЖЖ разрядының қуаты, газдардың қатынасы) әсері бойынша алғаш рет эксперименттік нәтижелер алынды. ЖЖ разрядын қолдана отырып, метанды сутегіне конверсиялау технологиясы жүзеге асырылды, максималды конверсия дәрежесі 82% және сутегі селективтілігі 15% болды. Аргон ортасындағы метанды ЖЖ разряды арқылы сутегіне айналдыру бойынша жүргізілген зерттеулердің нәтижелері метанның ыдырау тиімділігін арттыру үшін катализаторларды қолдану арқылы жүргізілетін эксперименттерде пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *пиролиз, аса жоғары жиілікті разряд, метанды конверсиялау, көміртек, сутегінің селективтілігі.*

EXPERIMENTAL STUDY OF METHANE CONVERSION IN A MICROWAVE DISCHARGE

M. K. Skakov[1], T. R. Tulenbergenov[2,3], I. A. Sokolov[2,3], A. Zh. Miniyazov[2], A. A. Agatanova[2,3*]

[1] RSE "National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan", Kurchatov, Kazakhstan
[2] "Institute of Atomic Energy" Branch RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan
[3] NPJSC "Shakarim University of Semey", Semey, Kazakhstan

** E-mail for contacts: agatanova@nnc.kz*

This paper presents the results of experiments on the production of hydrogen by methane pyrolysis using a microwave discharge at the PM-6 installation for applied research. For the first time, experimental results on the effect of installation parameters (microwave discharge power, gas ratio) on the efficiency of natural gas conversion to hydrogen have been obtained. The technology of hydrogen production using a microwave discharge, with a maximum methane conversion rate of up to 82% and hydrogen selectivity of up to 15%, has been implemented. The results of the conducted studies on hydrogen production from methane in an argon medium using a microwave discharge can be used in experiments on methane decomposition using catalysts to improve decomposition efficiency.

Keywords: *pyrolysis, microwave discharge, methane conversion, carbon, hydrogen selectivity.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-129-136
УДК 621.039.619; 621.384.8

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ГРАФИТОВЫХ ТАЙЛОВ ТОКАМАКА КТМ

К. Женис*, Б. Ж. Чектыбаев, А. Т. Кусаинов, В. С. Полковников, Д. А. Ольховик

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

** E-mail для контактов: kulan@nnc.kz*

В настоящей работе представлены результаты экспериментов по исследованию газовыделения графитовых тайлов токамака КТМ. Подробно описаны методика проведения эксперимента и конструкция экспериментального вакуумного стенда. Приведены зависимости газовыделения из графитовых тайлов от времени в процессе их отжига до температуры 200 °С в режиме постоянной откачки высоковакуумным насосом, имитирующих условия отжига в ВК КТМ. Также в работе проведён масс-спектрометрический анализ состава вакуумной среды в вакуумной камере экспериментального стенда перед прогревом и после остывания вакуумной камеры (ВК). Представлен анализ экспериментальных данных и проведены оценки предельного остаточного давления в ВК КТМ.

Ключевые слова: *токамак КТМ, вакуумный стенд, графитовые тайлы, масс-спектрометр, газовыделение.*

Введение

В настоящее время активно ведутся работы по исследованию материалов первой стенки будущих термоядерных реакторов. Токамак КТМ предназначен для проведения испытания материалов первой стенки и дивертора будущих термоядерных реакторов под воздействием мощных тепловых потоков плазмы до 20 МВт/м^2 [1].

В установках типа токамак предъявляются высокие требования к уровню остаточного газа (вакуума) в ВК. Вакуумные условия (уровень примесей) в значительной степени влияют на формирование плазменного шнура и его дальнейшее развитие. Уровень остаточного давления в ВК должен быть не выше 10^{-7} Торр.

Объем вакуумной камеры КТМ составляет около 13 м^3, площадь внутренней поверхности составляет около 32 м^2. Вакуумная камера изготовлена из нержавеющей стали. Почти вся внутренняя поверхность камеры около 90%, обращенная к плазме, облицована графитовыми тайлами, которые изготовлены из высокоплотного мелкозернистого графита марки FP-479.

Откачка ВК обеспечивается тремя турбомолекулярными насосами с эффективной скоростью около 2000 л/с [2].

На сегодняшний день остаточное давление в камере КТМ после отжига достигает значения ~$5\cdot10^{-7}$ Торр.

При этом из-за отсутствия данных по уровню газовыделения графитовых тайлов в условиях КТМ не представлялось возможным дать качественную оценку по предельному остаточному давлению и дать ответ об уровне реального натекания в ВК воздуха с атмосферы, и соответственно в перспективе провести работы по модернизации системы вакуумирования для достижения лучших вакуумных условий.

В результате проведения работ была разработана методика определения газовыделения графитовых тайлов КТМ, проведен масс-спектрометрический анализ выделяемого газового состава с тайлов и получены данные о их степени газовыделения в условиях КТМ. Похожие исследования с применением масс-спектрометрического анализа в своё время проводились в других установках [3–4].

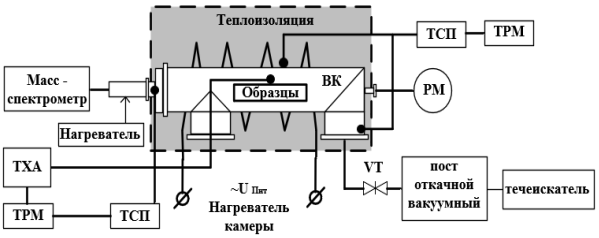
На основе полученных данных были проведены расчетные оценки предельно достижимого уровня остаточного давления в вакуумной камере КТМ. Проведен анализ и сделаны выводы о степени натекания воздуха с атмосферы в вакуумную камеру КТМ.

Экспериментальный вакуумный стенд

Экспериментальные исследования газовыделения из графитовых тайлов КТМ проводились на вакуумном стенде, что позволило имитировать технологическую подготовку ВК токамака к экспериментам. В качестве вакуумного стенда использовалась малогабаритная цилиндрическая вакуумная камера, оснащённая соответствующими фланцевыми соединениями, обеспечивающими возможность соединения форвакуумного насоса Varian Triscroll 300 Inverter и турбомолекулярного насоса Varian Turbo V-301, а также установки высоковакуумных датчиков и масс-спектрометра.

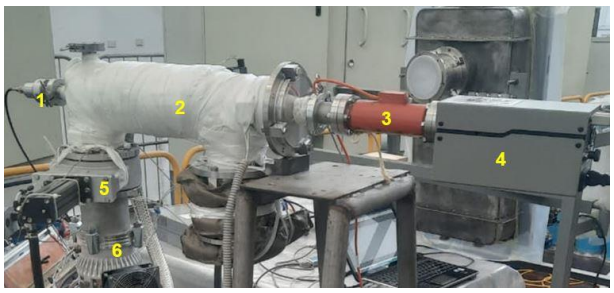
На рисунке 1 представлена принципиальная схема и общий вид экспериментальной установки.

Для обеспечения прогрева экспериментальной камеры применяется электрический нагреватель (ЭНГЛУ-400 1,27/220-4,1), расположенный на поверхности камеры. Камера обмотана негорючим теплоизоляционным материалом для минимизации потерь тепла. Напряжение, подаваемое на нагреватель, регулируется автотрансформатором ЛАТР-3KVA.



ТХА - термопара; ТСП - термопреобразователи сопротивления; ТРМ - измеритель регулятор; РМ - преобразователь манометрический; VT - затвор с пневмоуправлением; ВК - вакуумная камера

а)



1 - высоковакуумный датчик IMG100; 2 - вакуумная камера; 3 - нагревательный кожух O100HJR; 4 - масс-спектрометр RGA-100; 5 - затвор с пневмоуправлением; 6 - турбомолекулярный насос Turbo V-301

б)

Рисунок 1. Принципиальная схема (а) и общий вид (б) экспериментальной установки

Для контроля и измерения температуры стенок камеры применяются три термопреобразователя сопротивления ДТС014-РТ100.В3.20/30 (ТСП), установленные с внешней стороны камеры. Один ТСП устанавливается в центре камеры, другие два ТСП устанавливаются в торцах камеры на фланцах. Измерение непосредственно температуры нагрева исследуемого образца (тайла) проводилось с помощью термопары типа ХА, заведённой внутрь камеры и прикреплённой непосредственно к исследуемому образцу. Контроль за остаточным давлением в вакуумной камере осуществляется с использованием двух вакуумных датчиков – форвакуумного термопарного ConvecTor и высоковакуумного магниторазрядного IMG-100. Для определения и анализа состава остаточных газов в камере используется масс-спектрометр RGA-100.

Исследуемый образец

Для проведения исследования были взяты четыре графитовых тайла облицовки ВК КТМ. Тайлы изготовлены из графита марки FP-479 производства *Schunk Kohlenstofftechnik Gmbh, Германия.* Данная марка графита имеет высокую плотность, хорошие теплопроводные свойства, устойчивость к термическому удару, низкую индукционную активность графита и небольшое газообразование. В таблице 1 приведены геометрические размеры графитовых тайлов облицовки первой стенки токамака КТМ, выбранных для проведения экспериментов.

Таблица 1. Геометрические размеры образцов тайлов

№ п/п	Условная маркировка графита	Геометрические размеры, мм			
		B1	B2	H	b
1	КНЗ-1	108	118	92	18
2	КНЗ-2	106	106	90	18
3	КНЗ-3	98	107	92	18
4	КНЗ-4	87	96	92	18

На рисунке 2 показан чертёж образца КНЗ.

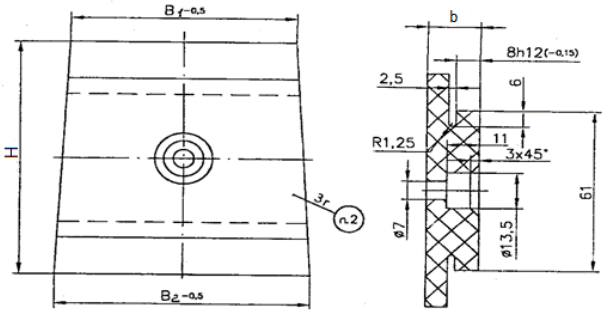
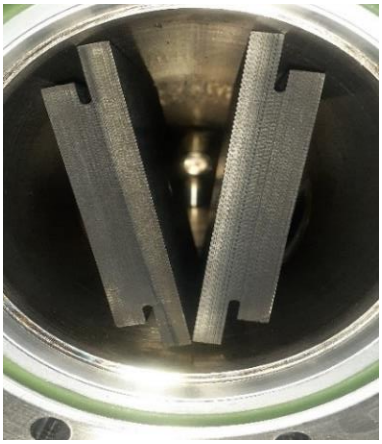


Рисунок 2. Чертёж графитового тайла.

На рисунке 3 показаны тайлы при их размещении в камере стенда для проведения исследований.



а)



б)

Рисунок 3. Размещение тайлов на стенде: с термопарой (а), установленные внутри стенда (б)

Методика проведения исследования образца

Методика проведения эксперимента по исследованию газовыделения из тайлов токамака КТМ включает следующие этапы:

1) Первоначально проводится эксперимент без графита. Вакуумная камера откачивается до предельного уровня высоковакуумным турбомолекулярным насосом. Изменение давления внутри камеры регистрируется вакуумными датчиками, а состав остаточных газов анализируется с помощью масс-спектрометра. После проводится проверка фланцевых соединений на герметичность с помощью гелиевого течеискателя (МС-4), методом обдува гелием. При обнаружении течей, принимаются меры по их устранению.

2) Затем осуществляется линейный нагрев камеры до температуры 200 °С в режиме непрерывной откачки. Длительность прогрева камеры при температуре 200 °С определяется достижением предельного уровня остаточного давления, которое практически не изменяется в течение длительного времени – нескольких часов. Далее камера остывает естественным образом до комнатной температуры. После остывания камеры фиксируется остаточное давление и регистрируется спектр состава остаточных газов. После чего производится измерение скорости падения остаточного давления при отсечении вакуумных насосов от объёма камеры.

По завершении всех измерений в камеру производится напуск атмосферного воздуха.

3) Далее в экспериментальную камеру устанавливаются графитовые тайлы и проводится ступенчатый нагрев камеры до температуры 200 °С в режиме непрерывной откачки объёма камеры турбомолекулярным насосом. После все операции выполняются в соответствии с пунктами 1 и 2.

В процессе эксперимента должны быть получены зависимости изменения остаточного давления газа от времени в объёме вакуумной камеры и зарегистрированы масс-спектры пустой камеры и с графитовыми тайлами.

Все измерения с тайлами и без них производятся при одинаковых условиях.

Результаты исследований

Эксперименты без графитовых тайлов

Результаты измерения давления в вакуумной камере во время эксперимента представлены на рисунке 4.

После сборки вакуумного стенда, была проведена откачка до предельного уровня остаточного давления $2{,}85 \cdot 10^{-7}$ Торр (рисунок 4). При достижении предельного давления в камере было произведено измерение масс-спектра остаточных газов. Далее производился линейный нагрев камеры до температуры 200 °С в режиме непрерывной откачки. По достижении температуры камеры 100 °С был включён нагревательный кожух O100HJR на масс-спектрометре с автоматическим нагревом до 200 °С. После достижения температуры камеры 200 °С, производилось удержание (стабилизация) на заданном уровне температуры, до достижения постоянного неизменного остаточного давления в камере. Затем было произведено снижение температуры до комнатной с непрерывной откачкой. После остывания камеры до комнатной температуры и достижения предельного остаточного давления в камере был снят масс-спектр остаточных газов.

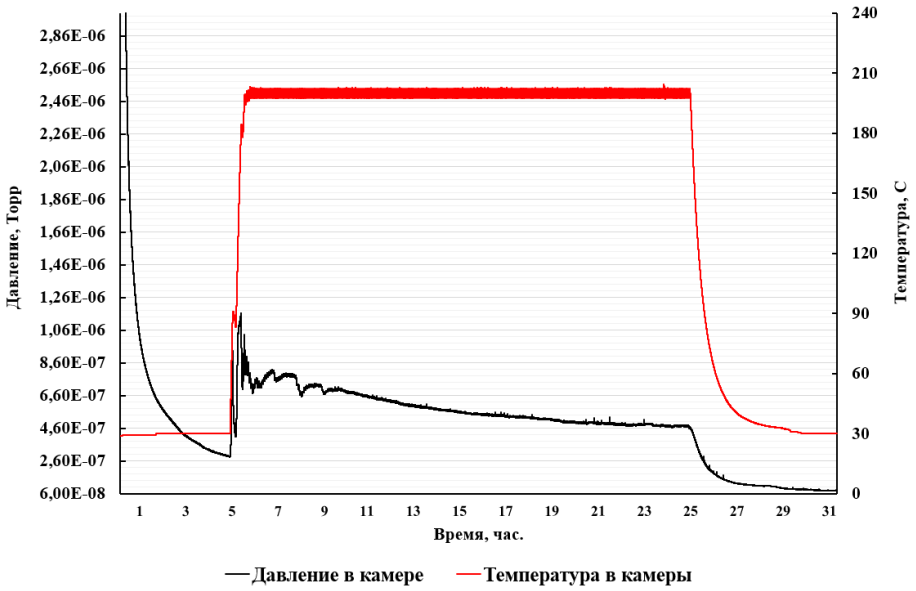


Рисунок 4. Временная зависимость изменения давления в процессе нагрева и остывания экспериментальной камеры

Как видно из рисунка 4, после включения нагрева начинается постепенный рост давления в камере, что связано с повышением газовыделения со стенок камеры в процессе отжига. После достижения стационарной температуры 200 °C наблюдается постепенное снижение давления, что объясняется уменьшением интенсивности газовыделения за счет постепенного снижения количества адсорбированных молекул газа на поверхности внутренних элементах вакуумной камеры. Примерно через 25 часов был отключён нагрев, что привело к дальнейшему снижению давления, так как скорость газовыделения уменьшается с понижением температуры. По мере остывания камеры до комнатной температуры предельное остаточное давление в камере достигло значения $6{,}5 \cdot 10^{-8}$ Торр.

Эксперименты с графитовыми тайлами

После размещения графитовых тайлов в вакуумную камеру была проведена откачка до предельного уровня остаточного давления $2{,}26 \cdot 10^{-7}$ Торр. Затем все операции по прогреву камеры повторились.

На рисунке 5 приведены графики изменения давления в камере и температуры графита в процессе нагрева и остывания.

После включения электронагревателя начинается постепенный рост давления в камере, обусловленный разогревом и интенсивным газовыделением графита в процессе отжига. Далее, при достижении температуры около 200 °C начинается снижение показания давления, что обусловлено постепенным обезгаживанием графита и уменьшением его газовыделения. В момент времени ~43 часа после начала эксперимента нагрев был отключён. Предельное остаточное давление в камере с графитовыми тайлами после их остывания до комнатной температуры составило $7{,}7 \cdot 10^{-8}$ Торр. Можно заметить, что остаточное давление в камере с тайлами выше, чем в пустой камере.

Масс-спектры остаточных газов в вакуумной камере до отжига ВК без графита и с графитом представлены на рисунке 6.

Как видно на рисунке 6, спектр содержит массы водорода (2), водяного пара (17) и (18), неона (20), азота или углекислого газа (28), кислорода (32), диоксида углерода (44).

Масс-спектры остаточных газов в вакуумной камере после остывания ВК без графита и с графитом представлены на рисунке 7.

Как можно видеть, парциальные давления остаточных газов в экспериментальной камере после отжига заметно снижаются. Например, пик воды с массой (18) уменьшился в 20 раз, а водород с массой (2) уменьшился в 19 раз, что свидетельствует о значительной десорбции этих молекул с поверхностей. Также можно отметить концентрации других газов, таких как масса кислорода (32), который уменьшился в 1,35 раза и масса диоксида углерода (44), который уменьшился в 10 раз. При этом основное отличие в ВК с графитом заключается в большем количестве содержания составляющих газов воздуха таких как, масса кислорода (32), азота или углекислого газа (28) которые увеличился в 1,5 раза. Это связано с более пористой микроструктурой графита, который обладает большей сорбционной способностью по сравнению с металлом.

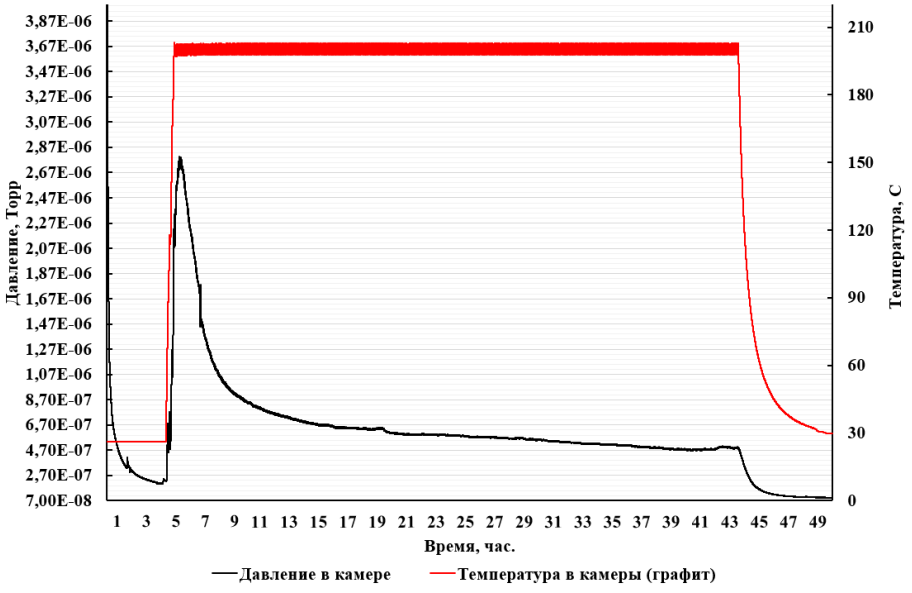


Рисунок 5. Временная зависимость изменения давления в процессе нагрева и остывания графита и экспериментальной камеры

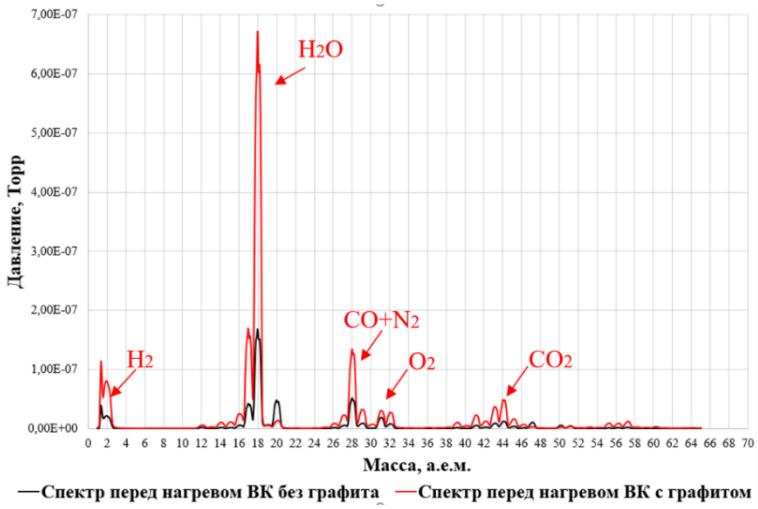


Рисунок 6. Масс-спектры остаточных газов в экспериментальной камере перед нагревом ВК без графита и с графитом при комнатной температуре (20 °С)

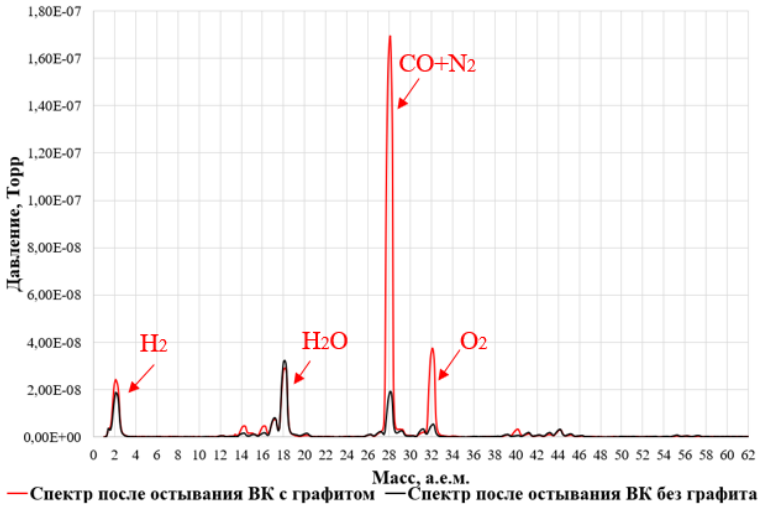


Рисунок 7. Спектр масс остаточных газов в экспериментальной камере после остывания ВК без графита и с графитом при комнатной температуре (20 °С).

Определение суммарного газовыделения

На основе полученных экспериментальных данных стендовых измерений зависимости изменения давления в камере без и с графитом были проведены расчёты по определению суммарного газового потока со всех тайлов, размещаемых в вакуумной камере КТМ.

Суммарный поток газов, поступающих в рабочий объем $Q_{\Sigma\,\text{стенд}}$, определяется следующим образом [5]:

$$Q_{\Sigma\text{стенд}} = p \cdot S_{эфф.\ стенд}\,, \qquad (1)$$

где p – давление в рабочей камере, Торр; $S_{эфф.\ стенд}$ – эффективная быстрота откачки насоса, л/с.

Используя основное уравнение вакуумной техники, рассчитывается эффективная быстрота откачки турбомолекулярного насоса [5]:

$$S_{эфф} = \frac{S_{эфф} U}{S_{эфф} + U}\,, \qquad (2)$$

где U – проводимость высоковакуумной системы, м^3/с; $S_{эфф}$ – быстрота действия основного насоса (по паспорту), м^3/с.

Проводимость соединительного патрубка рассчитывается как проводимость короткого трубопровода по формуле [5]:

$$U = 38{,}1 \cdot \frac{d^3}{l} \cdot \sqrt{T/M}\,, \qquad (3)$$

где d – внутренний диаметр трубопровода, 0,1 м; l – длина с учётом колена, 0,76 м; T – абсолютная температура, 298 К; M – молярная масса воздуха, 29 г/моль.

Трубопровод, соединяющий откачиваемый объем (ВК) с насосом, состоит из патрубка диаметром d = 0,1 м (рисунок 1). Для расчёта эффективной скорости откачки примем длину трубопровода с учётом колена, равной l = 0,666 м, что является расстоянием от входа в насос до центра камеры с установленными пластинами.

По результатам расчётов проводимость тракта составила $U = 0{,}183$ м^3/с.

В откачном посту использовался насос Turbo - V301 Navigator с быстротой действия $S_{эфф} = 0{,}25$ м^3/с (250 л/с). На входе насоса установлена защитная сетка, которая уменьшает скорость откачки примерно на 10%. Из уравнения (2) эффективная скорость откачки высоковакуумного насоса, составляет 100 л/с.

Суммарный поток газов, поступающих в рабочий объем стенда с графитом и без графита, равен:

$$Q_{\Sigma\ без\ тайл.} = 1{,}91\cdot10^{-6}\ \text{Торр·л/с},$$

$$Q_{\Sigma\ с\ тайл.} = 3\cdot10^{-6}\ \text{Торр·л/с}.$$

Из разности потока газов в камеру стенда с графитом и без него можно определить поток газа от четырёх тайлов после отжига, размещённых в камере стенда, который составил $Q_{4\ тайл} = 1{,}09\cdot10^{-6}$ Торр·л/с.

Общее количество графитовых тайлов внутри вакуумной камеры токамака КТМ составляет 1790 шт., которые имеют разные геометрические размеры. Зная общую площадь установленных графитовых тайлов внутри ВК КТМ, а также среднюю площадь 4-х графитовых тайлов (рисунок 2), можно определить общий газовый поток со всех графитовых тайлов в вакуумной камере КТМ, который равен:

$$Q_{общ.\ тайл\ КТМ} = Q_{.тайл}\frac{A_{КТМ}}{A_{эксп.}}, \qquad (4)$$

где $A_{ктм}$ – суммарная площадь поверхности всех графитовых тайлов КТМ (45,9 м^2); $A_{эксп.}$ – средняя площадь одного тайла, использованного в стенде (0,0195 м^2).

По результатам вычисления суммарное газовыделение со всех графитовых тайлов КТМ составляет $Q_{общ.тайл\ КТМ} = 6{,}4\cdot10^{-4}$ Торр·л/с.

В соответствии с уравнением (1) для определения предельного вакуумного давления КТМ нужно найти общий газовый поток (Q) в камере КТМ, который в общем складывается из суммы газовыделения внутрикамерных элементов и натекания через прокладки:

$$Q_{\Sigma\ общ.\ поток\ КТМ} = Q_{общ.\ тайл\ КТМ} + Q_{нерж.\ КТМ} + Q_{нат.\ КТМ} \qquad (5)$$

Поскольку найти из справочных данных значение газовыделения нержавеющей стали в условиях КТМ не представилось возможным, то эти данные также были найдены из проведенных стендовых измерений. Для этого дополнительно были определены справочные данные о натекании от используемых уплотнений типа VITON ISO-100, которые составили $Q_{нат.эксп} = 1{,}5\cdot10^{-7}\ \text{Торр}\cdot\text{л/с}$ [6].

Газовыделение стенок камеры из нержавеющей стали можно определить следующим образом:

$$Q_{нерж.\ стенд.} = Q_{\Sigma\ без\ тайл.} - Q_{нат.\ эксп.} = 1{,}76\cdot10^{-6}\ \text{Торр}\cdot\text{л/с}.$$

Теперь, зная газовыделение стенок экспериментальной ВК и его площадь, пропорционально можно найти газовыделение стенок ВК КТМ:

$$Q_{нерж.\ КТМ} = Q_{нерж.\ эксп.}\frac{A_{КТМ}}{A_{эксп.}} = 1{,}76\cdot10^{-4}\ \text{Торр}\cdot\text{л/с},$$

где $A_{КТМ}$ – площадь ВК КТМ, 32 м^2; $A_{эксп.}$ – площадь экспериментальной ВК, 0,32 м^2.

Натекание разъёмных соединений токамака КТМ можно найти следующим образом [7]:

$$Q_{нат.\ КТМ} = 450\sqrt{T/M}\cdot\frac{\pi\cdot d_{ср}}{a}\cdot R^2\cdot\Delta p\cdot e^{-3\frac{P_Д}{R_У}}, \qquad (6)$$

где T – абсолютная температура, 298 К; M – молярная масса воздуха, 29 г/моль; $d_{ср.}$ – средний диаметр резинового кольца, мм; $a - d_П(2\varepsilon+0{,}15)$ – ширина контакта прокладки с фланцем, мм; $d_П$ – диаметр толщины резинового кольца, мм; ε – степень деформации прокладки, примем ε=20%; $R = 3{,}2\cdot10^{-6}$ м – параметр шероховатости; $\Delta p - P_{атм.} - P_{в.}$ перепад давления в системе атмосфера-вакуум; $\Delta p - 5\cdot10^5$ Па; $P_Д - 5\cdot10^6$ Па; $R_У - 9\cdot10^5$ Па – коэффициент уплотнения.

Общее количество различных резиновых уплотнений в вакуумной камере токамака КТМ – 85 шт. Для проведения расчетов по оценке натекания через уплотнения не учитывались разъемные соединения с медным уплотнением, поскольку проницаемость медных уплотнений намного меньше ($<10^{-11}$ Торр л/с), чем резиновых.

По результатам расчёта натекание от соединений с резиновыми уплотнениями в КТМ составляет $Q_{нат.\ КТМ} = 3{,}4\cdot10^{-5}$ Торр·л/с.

Как можно увидеть, газовый поток от графитовых тайлов вносит наибольший вклад в суммарный поток газа в ВК КТМ.

Исходя из полученных данных из уравнения (1) было определено остаточное давление в вакуумной камере КТМ, которое составило $p_{КТМ} = 3{,}9\cdot10^{-7}$ Торр. Для проведения расчетов была определена эффективная скорость откачки вакуумной камеры токамака КТМ, которая составила $S_{эфф\ КТМ} = 2128$ л/с. Для достижения высокого вакуума внутри ВК КТМ используются три турбомолекулярных насоса Turbo-V 3K с быстротой действия $S_{эфф} = 2{,}2$ м^3/с (2200 л/с) каждый. На входе насоса установлена защитная сетка, которая уменьшает скорость откачки насоса примерно на 10%.

Таким образом, согласно полученным экспериментальным данным о газовыделении графитовых тайлов и проведенным расчетам было определено, что минимальное давления в ВК КТМ составляет $3{,}9\cdot10^{-7}$ Торр.

Также было рассчитано предельное давления в ВК КТМ в случае уменьшения количества тайлов в два раза и при полном их отсутствии – $P_{1/2\ тайлов} = 2{,}4\cdot10^{-7}$ Торр и $P_{без\ тайлов} = 9{,}5\cdot10^{-8}$ Торр, соответственно.

Заключение

Эксперименты, проведённые с графитовыми тайлами токамака КТМ, позволили получить зависимости изменения давления от времени в процессе нагрева и остывания в экспериментальной камере. Кроме того, были проанализированы масс-спектры газовыделения тайлов КТМ.

В результате проведённой работы были получены экспериментальные данные о степени газовыделения графитовых тайлов токамака КТМ и их влиянии на уровень вакуума.

На основе полученных данных проведена оценка предельного остаточного давления в вакуумной камере КТМ при отсутствии микротечей и допустимом уровне натекания через прокладки. Было установлено, что графитовые тайлы имеют достаточно заметное газовыделение и оказывают значительное влияние на уровень остаточного давления в ВК КТМ.

На основе проведённой работы можно сделать следующие выводы:

1. Предельное остаточное давление в вакуумной камере КТМ согласно расчетам ($p_{КТМ}$) с используемой системой вакуумной откачки при уровне натекания, не превышающем допустимые, составляет $3{,}9 \cdot 10^{-7}$ Торр.

2. При этом, по всей видимости, имеет место небольшое дополнительное натекание с атмосферы в вакуумную камеру КТМ, при устранении которого можно снизить уровень остаточного давления в камере КТМ с $5 \cdot 10^{-7}$ до $4 \cdot 10^{-7}$ Торр. Причиной дополнительного натекания может быть проницаемость резиновых уплотнений или недостаточная герметичность соединений ВК КТМ. Также возможно наличие пор или виртуальных течей или же других дефектов в камере, через которые происходит проникновение атмосферы.

3. Расчёты показали, что частичное или полное удаление графитовых тайлов способно снизить уровень остаточного давления до 10^{-8} Торр. Это указывает на заметное влияние графитовых тайлов на общий газовый поток и уровень вакуума в камере.

Таким образом, проведенное исследование позволило определить уровень газового потока с графитовых тайлов в условиях работы КТМ и определить возможные пути улучшения вакуумных условий.

Благодарность

Работа выполнена в рамках научно-технической программы BR23891779 «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на казахстанском материаловедческом токамаке КТМ» программно-целевого финансирования Министерства энергетики Республики Казахстан.

Авторы выражают искреннюю благодарность за помощь в проведении работ персоналу комплекса КТМ и сотрудникам отдела термоядерных исследований.

Литература

1. Чектыбаев Б.Ж., Батырбеков Э.Г., Скаков М.К., Садыков А.Д., Кашикбаев Е.А. О возможности повышения точности тепловизионных измерений кандидатных материалов первой стенки термоядерных реакторов на токамаке КТМ // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. – 2019. – Т. 42. – Вып. 4. – С. 21–30.
2. Образцов И.С., Рыжаков Д.В., Чектыбаев Б.Ж., Ольховик Д.А., Савкин В.И., Полковников В.С., Ибрагимхан Э.Е. Подготовка вакуумной камеры токамака КТМ к экспериментам // // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. – 2022. – Том 45. – Вып. 3. – С. 29–33.
3. Brezinsek S. Plasma-surface interaction in the Be/W environment: Conclusions drawn from the JET-ILW for ITER / S. Brezinsek // Journal of Nuclear Materials. – 2015. – Vol. 463. – P. 11–21.
4. Liga Avotina et al. Spectrometric analysis of inner divertor materials of JET carbon and ITER-like walls // Fusion Engineering and Design. – 2019. – Vol. 146, Part A. – P. 82–86. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.11.037
5. А.В. Юрьева. Расчёт вакуумных систем: Издательство Томского политехнического университета, 2012.
6. Газопроницаемость витоновых О-колец для вакуумных систем // https://chemtech.ru/gazopronicaemost-vitonovyh-o-kolec-dlja-vakuumnyh-sistem/
7. Е. А. Деулин, В. П. Михайлов, А. М. Базиненков. Расчёт вакуумных систем технологического оборудования. Из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022, 102 с.

References

1. Chektybaev B.Zh., Batyrbekov E.G., Skakov M.K., Sadykov A.D., Kashikbaev E.A. O vozmozhnosti povysheniya tochnosti teplovizionnykh izmereniy kandidatnykh materialov pervoy stenki termoyadernykh reaktorov na tokamake KTM // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Termoyadernyy sintez. – 2019. – Vol. 42. – Issue 4. – P. 21–30.
2. Obraztsov I.S., Ryzhakov D.V., Chektybaev B.Zh., Ol'khovik D.A., Savkin V.I., Polkovnikov V.S., Ibragimkhan E.E. Podgotovka vakuumnoy kamery tokamaka KTM k eksperimentam // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Termoyadernyy sintez. – 2022. – Vol. 45. – Issue 3. – P. 29–33.
3. Brezinsek S. Plasma-surface interaction in the Be/W environment: Conclusions drawn from the JET-ILW for ITER / S. Brezinsek // Journal of Nuclear Materials. – 2015. – Vol. 463. P. 11–21.
4. Liga Avotina et al. Spectrometric analysis of inner divertor materials of JET carbon and ITER-like walls // Fusion Engineering and Design. – 2019. – Vol. 146, Part A. – P. 82–86. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.11.037
5. A.V. Yur'eva. Raschet vakuumnykh sistem: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2012.
6. Gazopronitsaemost' vitonovykh O-kolets dlya vakuumnykh sistem // https://chemtech.ru/gazopronicaemost-vitonovyh-o-kolec-dlja-vakuumnyh-sistem/
7. E. A. Deulin, V. P. Mikhaylov, A. M. Bazinenkov. Raschet vakuumnykh sistem tekhnologicheskogo oborudovaniya. Iz-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2022, 102 p.

КТМ ТОКАМАГЫНЫҢ ГРАФИТТЫҚ ТАЙЛДАРЫНЫҢ ГАЗ ШЫҒАРУЫН ТӘЖІРИБЕЛІ ЗЕРІТТЕУ

Қ. Женіс*, Б. Ж. Чектыбаев, А. Т. Кусаинов, В. С. Полковников, Д. А. Ольховик

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

** Байланыс үшін E-mail: kulan@nnc.kz*

Бұл жұмыста КТМ токамагының графиттік тайлдарынан газ бөлінуін зерттеу бойынша эксперименттердің нәтижелері ұсынылған. Эксперимент жүргізу әдістемесі мен эксперименттік вакуумдық стендтің құрылысы егжей-тегжейлі сипатталған. Графиттік тайлдардан газ бөлінуінің 200 °С температураға дейінгі қыздыру барысында уақытқа тәуелділігі, жоғары вакуумдық сорғы арқылы тұрақты сордыру режимінде, КТМ вакуумдық камерасын қыздыру жағдайын имитациялай отырып, көрсетілген. Сондай-ақ, вакуумдық стенд камерасындағы вакуум ортасының құрамы қыздыру алдында және вакуумды камера (ВК) суығаннан кейін масс-спектрометриялық талдау жүргізілген. Эксперименттік деректерге талдау жасалып, КТМ ВК ішіндегі шекті қалдық қысым бағаланды.

Түйін сөздер: *токамак КТМ, вакуумдық стенд, графиттық тайл, масс-спектрометр, газ эмиссиясы.*

EXPERIMENTAL STUDY OF GAS EMISSION FROM GRAPHITE TILES OF THE KTM TOKAMAK

K. Zhenis*, B. Zh. Chektybaev, A. T. Kusainov, V. S. Polkovnikov, D. A. Olkhovik

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

** E-mail for contacts: kulan@nnc.kz*

This paper presents the results of experiments on the research of gas release from graphite tiles in a KTM tokamak. The methodology of the experiment and the design of the experimental vacuum stand are described in detail. The dependences of the gas release from graphite tiles over time during their annealing to a temperature of 200 °C with constant pumping using a high-vacuum pump, simulating the annealing conditions in a KTM vacuum chamber, are presented. The work also includes a mass spectrometric analysis of the composition of the vacuum medium in the vacuum chamber of the experimental stand before heating and after cooling the vacuum chamber (VC). An analysis of experimental data is presented and estimates of the maximum residual pressure in the KTM VC are given.

Keywords: *tokamak KTM, vacuum stand, graphite tiles, mass spectrometer, gas emission.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-137-143
УДК 543

ВЛИЯНИЕ МЕРКАПТОПРОПИЛТРИМЕТОКСИСИЛАНА НА ХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ МИКРОТРУБОК ЗОЛОТА В ТРЕКОВЫЕ МЕМБРАНЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИХ В СЕНСОРИКЕ

А. Х. Шакаева[1,2*], И. В. Корольков[1,2], Н. Жуманазар[1], Д. Т. Нурпеисова[2], М. В. Здоровец[1,2]

[1] РГП «Институт ядерной физики» МЭ РК, Алматы, Казахстан
[2] Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

** E-mail для контактов: shakayevaa19@gmail.com*

Диабет является одной из глобальных проблем здравоохранения, требующий создания надежных и точных устройств для мониторинга уровня глюкозы в крови. В данном исследовании был разработан неферментативный сенсор на основе модифицированной полиэтилентерефталатной трековой мембраны (ПЭТФ ТМ) для электрохимического определения глюкозы. Впервые была применена модификация мембраны с использованием меркаптопропилтриметоксисилана (МПТМС) с целью улучшения адгезии микроструктур золота и повышения эффективности процесса химического осаждения. Модификация позволила значительно увеличить площадь поверхности сенсора до 0,91±0,25 см^2. Вольтамперометрические измерения показали линейную зависимость между плотностью тока и концентрацией глюкозы в диапазоне от 0,1 до 16 мМ, предел обнаружения сенсоров Au@ПЭТФ ТМ-МПТМС составил 0,058 мМ. Разработанные сенсоры демонстрируют хорошую чувствительность и высокую стабильность, что расширяет их потенциальное применение в биосенсорике.

***Ключевые слова**: полиэтилентерефталатная трековая мембрана, темплатный синтез, нанотрубки золота, циклическая вольтамперометрия, квадратно-волновая вольтамперометрия.*

Введение

Сахарный диабет является одним из распространенных хронических заболеваний в мире, которым страдают миллионы людей. Диабет не только снижает качество жизни, но и приводит к серьезным осложнениям, таким как сердечно-сосудистые заболевания, почечная недостаточность, слепота и ампутация конечностей [1]. Для качественной жизни с диабетом необходимы надежные и точные устройства для постоянного мониторинга уровня глюкозы в крови. Разработка и совершенствование сенсоров глюкозы ведется уже пять десятилетий, начиная с работы Кларка в 1962 году, где впервые был представлен ферментативный сенсор [2]. Большинство современных сенсоров основаны на иммобилизации глюкозооксидазы, которые обладают высокой селективностью, чувствительностью, быстротой и обратимостью. Однако основным минусом является их недостаточная стабильность и особые условия хранения [3]. Альтернативным подходом, привлекающим значительное внимание в последние годы, является разработка неферментативных сенсоров глюкозы. В последнее время было разработано множество сенсорных систем с применением различных микро- и наноматериалов, таких как платина, золото, никель, медь, палладий и углерод [4]. Среди них золото является привлекательным металлом, поскольку золотые электроды демонстрируют более высокую электроактивность при окислении глюкозы [5].

Высокая электрокаталитическая активность сенсоров на основе золотых микроструктур привлекает все больше ученых, которые ищут новые методы получения высокочувствительных электрохимических сенсоров для детектирования веществ. Авторами [6, 7] были получены сенсоры на основе наночастиц золота, полученные методом магнетронного напыления на поливинилиденфторид (ПВДФ) и ПЭТФ ТМ для определения ионов тяжелых металлов в природных объектах. Так, авторами [8] был сконструирован электрохимический сенсор для определения глюкозы в модельных и реальных образцах. Данный сенсор получен на основе ПЭТФ ТМ с предварительной фотоинициированной прививочной полимеризацией 2-гидроксиэтилметакрилата на поверхность ПЭТФ ТМ, с последующей модификацией полиаллимаином и меркаптофенилборной кислотой для улучшения характеристик полученных сенсоров. В качестве электроактивного слоя в работе использовали наночастицы золота, полученные методом магнетронного напыления. Несмотря на хорошие результаты и высокую чувствительность к определяемым ионам, данные сенсоры обладали быстрой деградации проводящего слоя. Авторами [9] был получен неферментативный сенсор на основе композитов трехмерных конических наноструктур золота на слое MXene. Данные сенсоры имеют широкий линейный диапазон, низкий предел обнаружения и быстрое время отклика. В данной работе [10] авторы создали электрод на основе нанопроволок золота, изготовленных темплатным синтезом, которые были использованы в качестве неферментативного сенсора для глюкозы. Данные сенсоры имели чувствительность до 20 мМ и были изучены методом дифференциальной пульсовой вольтамперометрии. Таким образом, наноструктуры золота имеют перспективное потенциальное применение для неферментативного электрохимического обнаружения глюкозы.

Металлические нанотрубки представляют собой новую категорию одноразмерных наноструктур, обладающие уникальными магнитными, каталитическими, механическими, оптическими и электрохимическими свойствами [11]. Эти материалы широко применяются в различных областях, включая электрохимическое преобразование энергии, гетерогенный катализ, электрохимию, биоинженерию, медицину, усиленную поверхностно-индуцированную спектроскопию комбинационного рассеивания [12–16]. По сравнению с более традиционными морфологиями, такими как наночастицы, металлические нанотрубки, благодаря полой морфологии обеспечивают дополнительную площадь поверхности, облегчают диффузию реагентов и жидкостный перенос, а также стабильность при электрохимических измерениях [17]. Большинство методов синтеза металлических нанотрубок основывается на использования шаблонов для формирования трубчатой формы. Использование трековых мембран в качестве шаблона имеет ряд преимуществ, таких как регулирование диаметра, ориентации и плотности получаемых наноструктур [18]. Трековые мембраны (ТМ) – один из наиболее универсальных и интенсивно изучаемых материалов, который используется для фильтрации воды, культивирования клеток и исследования их активности, мембранной дистилляции, производства катализаторов и т.д. [19]. Некоторые полимеры, такие как полиэтилентерефталат (ПЭТФ), поликарбонат (ПК), полиимид (ПИ), полипропилен (ПП) и поливинилиденфторид (ПВДФ), широко используются для получения ТМ. Трековые мембраны обладают такими преимуществами, как узкое распределение пор по размерам, небольшая толщина и гибкость, а также химическая и биологическая совместимость [20]. Микро- и нанопоры в мембране улучшают массоперенос и повышают чувствительность сенсора.

В процессе синтеза металлических нанотрубок с использованием шаблонов могут применяться различные методы осаждения, такие как электроосаждение, темплатный синтез или испарение. Среди этих методов темплатный синтез имеет много преимуществ. Этот метод не требует сложного оборудования и совместим со сложными по форме и чувствительными к нагреву шаблонами. Во время осаждения нанотрубок мембрана просто погружается в раствор для осаждения, что делает процесс простым, экономически эффективным и масштабируемым [21–23]. Можно получить четко определенные нанотрубки, состоящие из различных металлов, при этом толщина стенок легко регулируется временем осаждения. Темплатный синтез приводит к равномерному нанесению металла, то есть металлическая пленка непрерывно растет по всей поверхности шаблона. В порах шаблона осаждение металла происходит с высоким соотношением длины к диаметру, когда как метод физического осаждения из паровой фазы обычно приводит к образованию коротких нанотрубок [18].

В нашей работе ПЭТФ ТМ были модифицированы МПТМС, содержащий тиогруппу и изучено влияние модификации на темплатный синтез микротрубок золота. Полученные металлические мембраны были использованы для обнаружения глюкозы методом квадратно-волновой вольтамперометрии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Реагенты

Меркаптопропилтриметоксисилан (МПТМС) (95%), хлорид олова (II), тетрафторуксусная кислота (99%), нитрат серебра, сульфит натрия, гидроксид натрия, гидрокарбонат натрия, ледяная уксусная кислота, аммиак водный (35%), формальдегид (40%), перекись водорода (30%), этанол (98%), PBS (pH=7), азотная кислота (65%), глюкоза. Деионизированная вода (18,2 МΩ) для промывания образцов и приготовления растворов была получена на установке «Аквилон-D 301» (Россия).

Методы анализа свойств и структуры трековых мембран

Для определения диаметра пор ТМ была использована установка для изучения газопроницаемости мембран. Морфология поверхности образцов и элементный анализ поверхности ТМ были изучены с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Hitachi TM 3030 с системой микроанализа Bruker XFlash MIN SVE. Потенциостат PalmSens EmStat3+ использовали для всех электрохимических измерений.

Подготовка трековых мембран

ПЭТФ ТМ были получены на циклотроне ДЦ-60 (Астанинский филиал Института ядерной физики, Республика Казахстан) путем облучения ПЭТФ пленки с толщиной 12 мкм ионами криптона с энергией 1,75 МэВ/нуклон и плотностью пор $1{,}12 \cdot 10^8$ ионов/см^2, с последующей сенсибилизацией образцов под УФ-лампой в течение 30 минут с каждой стороны. Химическое травление облученной пленки было проведено в 2,2 М растворе гидроксида натрия при постоянной температуре (85±1 °C), с последующей нейтрализацией в уксусной кислоте и в воде. После образцы высушивали на воздухе при комнатной температуре. Диаметр использованных ПЭТФ ТМ ~250±10 нм.

Модификация ПЭТФ ТМ и темплатный синтез микротрубок золота

Мембраны размером 5×7,5 см окисляли при pH = 3 (HCl) в 0,3 М растворе перекиси водорода в течение 90 минут с каждой стороны в УФ-боксе с ртутными лампами 190 Вт. После процесса окисления ТМ промывали в деионизированной воде два раза и сушили на воздухе при комнатной температуре. После полученные образцы вымачивали в 20 мМ спиртовом растворе МПТМС в течение суток при комнатной температуре. Модифицированные образцы промывали в этаноле и воде, высушивали. Микротрубки золота были получены темплатным методом по методике [24], который состоит из 4 последовательных стадий: сенсибилизация, активация, зародышеобразование и осаждение. Последовательная схема темплатного синтеза микротрубок золота представлена на рисунке 1.

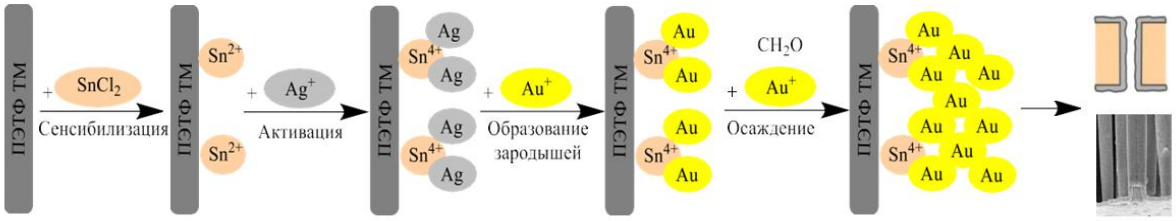


Рисунок 1. Схема получения микротрубок золота внутри пор ТМ

На стадии сенсибилизации образец погружали в водный раствор 0,026 М хлорида олова (II) и 0,07 М тетрафторуксусной кислоты на 45 минут. После мембраны промывали в течение 5 минут в теплой проточной воде и дважды в деионизированной. На второй стадии процесса мембрана была погружена в раствор аммиачного нитрата серебра (0,059 М нитрата серебра и 0,230 М аммиака) на 5 минут, с последующим промыванием в теплой воде. На заключительном этапе ПЭТФ ТМ погружали в раствор золочения, состоящий из 0,127 М сульфита натрия, 0,625 М формальдегида, 0,025 М гидрокарбоната натрия и раствора $Na_3[Au(SO_3)_2]$ (соотношение 1:10). Осаждение золота проводили при температуре 4−8 °С при pH = 10 в течение 15 часов, после в раствор дополнительно было добавлено 0,03 М формальдегида и осаждение проводили еще в течение 9 часов. Образцы после стадии осаждения промывали в этаноле и в воде дважды в течение 15 минут. Для удаления всех непрореагировавших ионов, ПЭТФ ТМ погружали в 25% раствор азотной кислоты на сутки. После образцы промывали в воде и высушивали.

Конструирование сенсоров и вольтамперометрические измерения

На ПЭТФ ТМ с размером 1×0,5 см прикрепляли медный провод с помощью серебряной пасты, после чего его изолировали лаком и воском. Все вольтамперометрические измерения проводили в трехэлектродной электрохимической ячейке. Полученный сенсор использовали в качестве рабочего электрода, платиновый электрод – вспомогательного, а хлорсеребряный (1 М KCl) применялся в качестве электрода сравнения. Растворы глюкозы разных концентраций растворяли в PBS и помещали в вольтамперометрическую ячейку, перемешивали в течение 15 минут. После проводили этап накопления (60 секунд при −1,2 В). Диапазон измерений от −1 до +1 В при частоте 5 Гц и амплитуде 30 мВ.

Для всех образцов была определена реальная площадь поверхности сенсоров методом циклической вольтамперометрии в 0,1 М серной кислоте. Диапазон измерений от −0,3 до +1,8 В, скорость 100 мВ/сек. Расчет реальной площади поверхности сенсора вели согласно формуле:

$$S_{реал.} = \frac{S_к}{Q_0^s \cdot \vartheta},$$

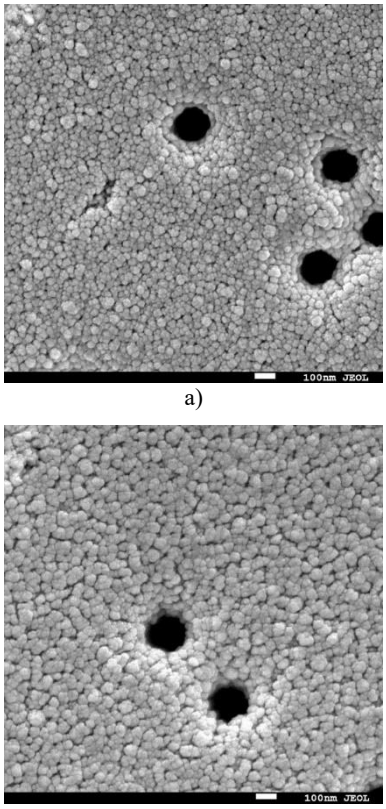
где, $S_{реал.}$ – реальная площадь поверхности сенсора; $S_к$ – площадь под катодным пиком; Q_0^S – заряд, соответствующий монослойной адсорбции кислорода на единице поверхности; ϑ – скорость развертки потенциала.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предварительное окисление мембран приводит к увеличению функциональных (гидроксильных и карбоксильных) групп [25], которые способствуют лучшему закреплению меркаптосилана. Модификация МПТМС проходит за счет образования ковалентных связей с функциональными группами на поверхности ПЭТФ ТМ в результате их гидролиза (Si-O). Поскольку сульфгидрильные группы МПТМС обладают высокой аффинностью к золоту, модификация меркаптосиланами создает идеальные якорные точки для зародышеобразования и в дальнейшем к формированию микротрубок золота [12, 26]. Для подтверждения модификации МПТМС был проведен элементный анализ полученных мембран. Исходя из полученных данных, количество кремния (об. %) составило 0,71±0,15% и серы 2,0±0,09%.

Согласно источникам, кинетика химического осаждения зависит от изменения концентрации золота, pH и температуры осаждения [27]. Изменение данных параметров позволяет контролировать морфологию, размер и качество микротрубок, что также важно для их дальнейшего применения. Морфологии поверхности полученных после темплатного синтеза мембран представлены на рисунке 2.

На изображениях видно, что наночастицы золота у модифицированной МПТМС ПЭТФ ТМ (Au@ПЭТФ ТМ-МПТМС) равномерные по размеру и форме чем у не модифицированной (Au@ПЭТФ ТМ). Распределение наночастиц вокруг пор мембран более плотное и организованное, что говорит о лучшей адгезии золота к поверхности мембраны благодаря модификации. После темплатного синтеза микротрубок золота наблюдается значительное уменьшение диаметра пор в образце Au@ПЭТФ ТМ-МПТМС до 156±9 нм и в образце Au@ПЭТФ ТМ до 161±5 нм. Также наблюдается тенденция уменьшения наночастиц золота, находящиеся на поверхности ПЭТФ ТМ после модификации. Средний размер наночастиц у образца Au@ПЭТФ ТМ составил 41±0,52 нм и у Au@ПЭТФ ТМ-МПТМС 26±0,3 нм. Получение наночастиц меньшего размера приводит к увеличению шероховатости и, следовательно, к увеличению электроактивной площади взаимодействия.



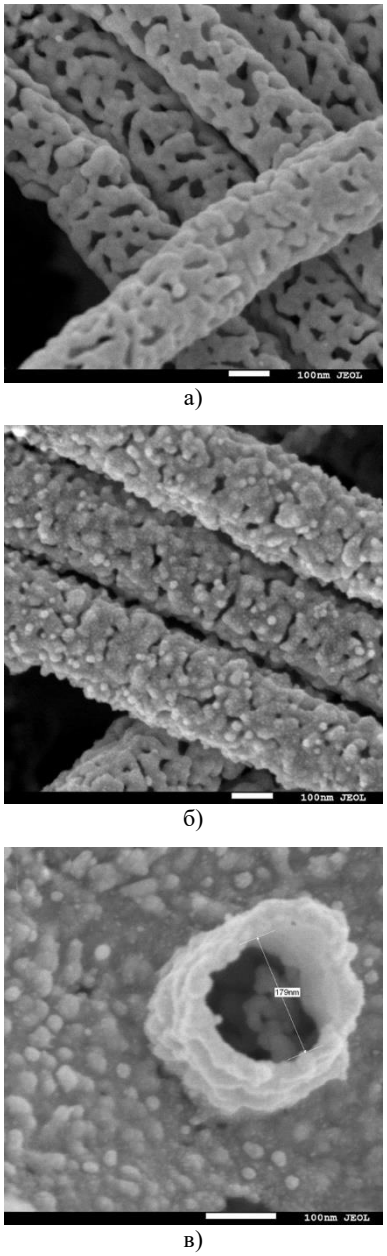
а)

б)

Рисунок 2. Морфология поверхности ПЭТФ ТМ после темплатного синтеза микротрубок золота не модифицированной (а) и модифицированной МПТМС (б) мембраны

Подтверждение образования микротрубок золота внутри пор трековой мембраны также было изучено на основе СЭМ изображений, выделенных микротрубок путем растравливания ПЭТФ ТМ в 8М растворе гидроксида натрия. На рисунке 3 представлены СЭМ-изображения полученных микротрубок. Наружный диаметр микроструктур соответствует диаметру исходной ТМ. На представленных изображениях, можно заметить, что не модифицированная мембрана имеет явные пустоты и неоднородности, когда как модификация МПТМС привела к формированию однородных наноструктур.

Сенсоры, модифицированные МПТМС**,** обладают большой реальной площадью поверхности по сравнению с не модифицированной мембраной, что делает их более эффективными в плане электрохимической активности. Площадь поверхности составила 0,91±0,25 см^2 для сенсоров Au@ПЭТФ ТМ-МПТМС, тогда как для Au@ПЭТФ ТМ $S_{реал.}$ = 0,64±0,12 см^2 при геометрической площади сенсоров 0,5 см^2. Циклические вольтамперограммы представлены на рисунке 4.



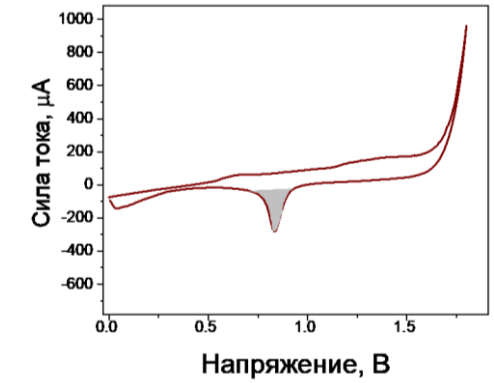
а)

б)

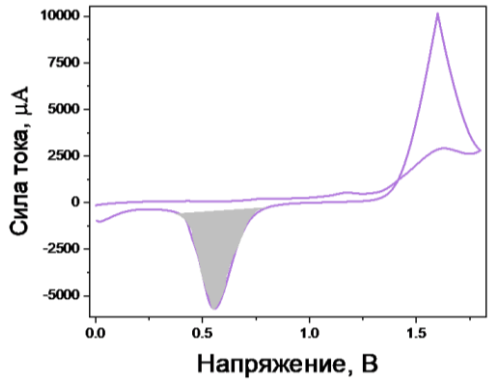
в)

Рисунок 3. СЭМ-изображения не модифицированных (а) и модифицированных МПТМС (б, в) микротрубок золота

Стабильность полученных сенсоров была изучена методом циклической вольтамперометрии. Оба сенсора показали постепенное снижение активности после многократных циклов, указывающее на деградацию поверхности с течением времени. Однако сенсор, модифицированный МПТМС, показывает более устойчивое снижение активности в течение 200 циклов, тогда как не модифицированный – только 150. Длительное хранение сенсоров не приводит к потере электроактивной способности.

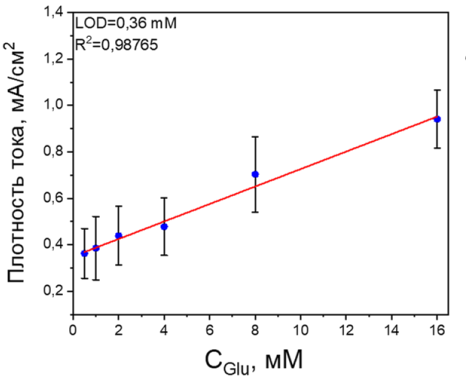


а)

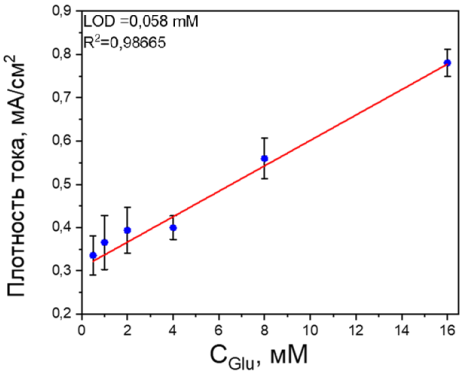


б)

Рисунок 4. Вольтамперограммы измерений в 0,1 М серной кислоте сенсоров Au@ПЭТФ ТМ (а) и Au@ПЭТФ ТМ-МПТМС (б)



а)



б)

Рисунок 5. Линейная зависимость между плотностью тока и концентрацией глюкозы сенсоров Au@ПЭТФ ТМ (а) и Au@ПЭТФ ТМ-МПТМС (б)

Согласно полученным калибровочным графикам (рисунок 5) сенсор, модифицированный МПТМС демонстрирует значительно лучшую чувствительность, что отражается в низком пределе обнаружения (0,058 мМ) по сравнению с не модифицированным сенсором (0,35 мМ). Оба сенсора демонстрируют линейную зависимость плотности тока от концентрации глюкозы в диапазоне от 0,1 мМ до 16 мМ. Данные сенсоры подходят для обнаружения низких концентраций глюкозы, что делает их перспективными для аналитических измерений в биосенсорике.

В таблице представлены результаты сравнения характеристик разработанного сенсора с другими ранее исследованными сенсорами. Согласно полученным данным можно сделать вывод, что разработанный электрохимический сенсор на основе ПЭТФ ТМ с микротрубками золота имеет средний предел обнаружения и широкий линейный диапазон концентраций. Преимуществом разработанного сенсора для обнаружения глюкозы является быстрота подготовки и отличная стабильность. Эти преимущества делают данный вид сенсоров потенциально применимыми в качестве неферментативного сенсора глюкозы.

Таблица. Сравнение неферментативный сенсоров для электрохимического определения глюкозы

№	Сенсор для определения глюкозы	Диапазон концентраций Glu	LOD (μM)	Используемый метод	Ссылка
1	Нанопроволоки Au	1–10 мМ	50	ДПВ	[10]
2	Наноструктуры Au иммобилизованные на MXene	0,1 нМ–10 мМ	0,00143	ЦВ, ДПВ	[9]
3	Сплав PtAu	0,01–10 мМ	3	ЦВ	[11]
4	Au/CuO/УЭ	2–397 мкМ	7,24	ЦВ	[28]
5	Модифицированные ПЭТФ ТМ с наночастицами Au	0,1–8 мМ	100	КВВ	[8]
6	Полианилин с наночастицами Au/ MnO_2	0–50 мМ	—	ЦВ	[29]
7	Модифицированная МПТМС ПЭТФ ТМ с микротрубками золота	0–16 мМ	58	ЦВ	эта статья

Заключение

В данной работе было изучено влияние модификации МПТМС на темплатный синтез микротрубок золота внутрь каналов трековых мембран. Модификация меркаптосиланом привела к образованию микротрубок с минимальным количеством дефектов, что было подтверждено изображениями СЭМ. Также поверхность ПЭТФ ТМ демонстрирует более плотное и равномерное покрытие наночастицами золота малого размера, что привело к увеличению реальной площади поверхности сенсоров. Сенсоры продемонстрировали высокую чувствительность к глюкозе и хорошую стабильность в ходе многократных циклов электрохимических измерений. Данные сенсоры могут быть использованы для применения в биосенсорах и электрохимических устройствах, где требуется высокая точность и надежность. Модификация меркаптосиланами помогает расширить область потенциальной возможности практического применения сенсоров.

Данное исследование финансировалось Министерством энергетики Республики Казахстан (BR23891691).

Литература / References

1. Hassan M.H., Vyas C., Grieve B. Recent advances in enzymatic and non-enzymatic electrochemical glucose sensing // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – No. 4672. – P. 1–26.
2. Clark L.C., Lyons C. Electrode systems for continuous monitoring in cardiovascular surgery // Annals of the New York Academy of Sciences. – 1962. – Vol. 102. – No. 12. – P. 29–45.
3. Sehit E., Altintas Z. Significance of nanomaterials in electrochemical glucose sensors: An updated review (2016-2020) // Biosensors and Bioelectronics. – 2020. – Vol. 159. – No. 112165. – P. 1–18.
4. Patle S., Rotake D. Recent advances, technological challenges and requirements to predict the future treads in wearable sweat sensors: A critical review // Microchemical Journal. – Elsevier Inc., 2024. – Vol. 200.
5. Gonzalez-Rodriguez R. et al. Gold Nanoparticles in Porous Silicon Nanotubes for Glucose Detection // Chemosensors. – Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2024. – Vol. 12. – No. 4. – P. 63.
6. Bessbousse H. et al. Functionalized Nanoporous Track-Etched b-PVDF Membrane Electrodes for Heavy Metal Determination by Square-Wave Anodic Stripping Voltammetry.
7. Zhumanazar N. et al. Electrochemical detection of lead and cadmium ions in water by sensors based on modified track-etched membranes // Sensors and Actuators A: Physical. – 2022. – Vol. 76. – No. 9. – P. 114094–114112.
8. Shakayeva A.K. et al. Electrochemical sensors based on modified track–etched membrane for non-enzymatic glucose determination // Microchemical Journal. – Elsevier, 2023. – Vol. 193. – P. 109003.
9. Bian X. et al. High electrochemical performance of glucose detection based on tapered gold nanostructures and MXene layers // Sensors and Actuators Reports. – Elsevier, 2024. – Vol. 8. – P. 100232.
10. Cherevko S., Chung C.H. Gold nanowire array electrode for non-enzymatic voltammetric and amperometric glucose detection // Sensors and Actuators, B: Chemical. – 2009. – Vol. 142. – No. 1. – P. 216–223.
11. Muench F. et al. Templated synthesis of pure and bimetallic gold/platinum nanotubes using complementary seeding and plating reactions // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – Elsevier B.V., 2016. – Vol. 508. – P. 197–204.
12. Wang S. et al. Hierarchical metal-dielectric-metal nanostructures as SERS sensors for sensitive detection of polycyclic aromatic hydrocarbons // Applied Surface Science. – North-Holland, 2024. – Vol. 646. – P. 158926.
13. Sharma S., Kumar R., Yadav R.M. Polyacrylonitrile as a versatile matrix for gold nanoparticle-based SERS substrates // Nanoscale Advances. – Royal Society of Chemistry, 2024. – Vol. 6. – No. 4. – P. 1065–1073.
14. Zhumanazar N. et al. Electrochemical detection of lead and cadmium ions in water by sensors based on modified track-etched membranes // Sensors and Actuators A: Physical. – 2023. – Vol. 354.
15. Badoni A., Prakash J. Noble metal nanoparticles and graphene oxide based hybrid nanostructures for antibacterial applications: Recent advances, synergistic antibacterial activities, and mechanistic approaches // Micro and Nano Engineering. – Elsevier, 2024. – Vol. 22. – P. 100239.
16. Hormozi Jangi S., Khoobi A. Detection of cadmium heavy metal ions using a nanostructured green sensor in food, biological and environmental samples // Food Chemistry. – Elsevier, 2024. – Vol. 458. – P. 140307.
17. Vellemana L., Shapter J.G., Losic D. Gold nanotube membranes functionalised with fluorinated thiols for selective molecular transport // Journal of Membrane Science. – Elsevier, 2009. – Vol. 328. – No. 1–2. – P. 121–126.
18. Muench F. Electroless Plating of Metal Nanomaterials // ChemElectroChem. – 2021. – Vol. 8. – No. 16. – P. 2993–3012.
19. Mashentseva A.A. et al. Composite Track-Etched Membranes: Synthesis and Multifaced Applications // Polymers 2024, Vol. 16, Page 2616. – Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2024. – Vol. 16. – No. 18. – P. 2616.
20. Kozlovskiy A. et al. PET ion-track membranes: Formation features and basic applications // Springer Proceedings in Physics. – Springer Science and Business Media, LLC, 2019. – Vol. 221. – P. 461–479.
21. Yang M. et al. Highly ordered gold-nanotube films for flow-injection amperometric glucose biosensors // RSC Advances. – Royal Society of Chemistry, 2014. – Vol. 4. – No. 76. – P. 40286–40291.
22. Galbiati S., Morin A., Pauc N. Nanotubes array electrodes by Pt evaporation: Half–cell characterization and PEM fuel cell demonstration // Applied Catalysis B: Environmental. – Elsevier, 2015. – Vol. 165. – P. 149–157.
23. Shao P., Ji G., Chen P. Gold nanotube membranes: Preparation, characterization and application for enantioseparation. – 2005. – Vol. 255. – P. 1–11.
24. Menon V.P., Martin C.R. Fabrication and Evaluation of Nanoelectrode Ensembles. – 1995. – Vol. 67. – No. 13. – P. 1920–1928.
25. Korolkov I. V. et al. The effect of oxidizing agents/systems on the properties of track-etched PET membranes //

Polymer Degradation and Stability. – Elsevier, 2014. – Vol. 107. – P. 150–157.
26. Xue Y. et al. Quantifying thiol–gold interactions towards the efficient strength control // Nature Communications 2014 5:1. – Nature Publishing Group, 2014. – Vol. 5. – No. 1. – P. 1–9.
27. Velleman L., Shapter J.G. Gold nanotube membranes // Materials. – 2013. – Vol. 7. – No. 4. – P. 1–27.
28. Ali M.Y. et al. Green synthesized gold nanoparticles and CuO-based nonenzymatic sensor for saliva glucose monitoring // RSC Advances. – The Royal Society of Chemistry, 2024. – Vol. 14. – No. 1. – P. 577–588.
29. Okamoto K. et al. Gold/MnO_2 particles decorated on electrodeposited polyaniline toward non-enzymatic electrochemical sensor for glucose // Micro and Nano Engineering. – Elsevier, 2023. – Vol. 18. – P. 100175.

МЕРКАПТОПРОПИЛТРИМЕТОКСИСИЛАННЫҢ ТРЕКТІ МЕМБРАНАЛАРЫНА АЛТЫН МИКРОТҮТІКТЕРДІҢ ХИМИЯЛЫҚ ТҰНДЫРУ ПРОЦЕСІНЕ ӘСЕРІ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ СЕНСОРЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДЕ ҚОЛДАНЫЛУЫ

А. Х. Шакаева[1,2*], И. В. Корольков[1,2], Н. Жуманазар[1], Д. Т. Нурпеисова[2], М. В. Здоровец[1,2]

[1] ҚР ЭМ «Ядролық физика институты» РМК, Алматы, Қазақстан
[2] Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

** Байланыс үшін E-mail: shakayevaa19@gmail.com*

Қант диабеті – қандағы глюкоза деңгейін бақылауға арналған сенімді және дәл құрылғыларды жасауды қажет ететін денсаулық сақтау саласындағы маңызды мәселелердің бірі. Бұл зерттеуде глюкозаны электрохимиялық анықтауға арналған модификацияланған полиэтилентерефталатты тректі мембраналар (ПЭТФ ТМ) негізінде ферментсіз сенсор жасалды. Мембрананы алтын наноқұрылымдарының адгезиясын жақсарту және алтынды химиялық тұндыру процесінің тиімділігін арттыру мақсатында меркаптопропилтриметоксисиланмен (МПТМС) модификациялау қолданылды. Модификация сенсордың бетінің ауданын 0,91±0,25 см²-ге дейін айтарлықтай арттырды. Вольтамперометриялық өлшеулер ток тығыздығы мен глюкоза концентрациясы арасындағы сызықтық тәуелділікті 0,1-ден 16 мМ-ге дейін көрсетті, ал Au@ПЭТФ ТМ/МПТМС сенсорларының анықтау шегі 0,058 мМ құрады. Жасалған сенсорлар жоғары сезімталдық пен тұрақтылықты көрсетеді, бұл олардың биосенсорикада қолданылу мүмкіндігін кеңейтеді.

Түйін сөздер: *полиэтилентерефталатты тректі мембрана, темплатты синтез, алтын микротүтіктер, циклдік вольтамперометрия, квадрат-толқынды вольтамперометрия.*

INFLUENCE OF MERCAPTOPROPYLTRIMETHOXYSILANE ON THE CHEMICAL DEPOSITION OF GOLD MICROTUBES IN TRACK-ETCHED MEMBRANES AND THEIR APPLICATION IN SENSOR TECHNOLOGY

A. Kh. Shakayeva[1,2*], I. V. Korolkov[1,2], N. Zhumanazar[1], D. T. Nurpeisova[2], M. V. Zdorovets[1,2]

[1] RSE "Institute of Nuclear Physics" ME RK, Almaty, Kazakhstan
[2] L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

** E-mail for contacts: shakayevaa19@gmail.com*

Diabetes is one of the global healthcare problems requiring the development of reliable and accurate devices for monitoring blood glucose levels. In this study, a non-enzymatic sensor based on a modified poly (ethylene terephthalate) track-etched membrane (PET TeMs) was developed for the electrochemical detection of glucose. For the first time, membrane modification using mercaptopropyltrimethoxysilane (MPTMS) was applied to improve the adhesion of gold nanostructures and enhance the efficiency of the gold electroless deposition process. The modification significantly increased the sensor real surface area to 0.91±0.25 cm². Voltammetric measurements showed a linear dependence between the current density and glucose concentration in the range of 0.1 to 16 mM, with a detection limit of 0.058 mM for Au@PET TeMs/MPTMS sensors. The developed sensors demonstrate good sensitivity and high stability, broadening their potential application in biosensing.

Keywords: *poly (ethylene terephthalate) track-etched membrane, template synthesis, gold microtubes, cyclic voltammetry, square-wave voltammetry.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-144-153
УДК 577.4: 577.391: 539.16: 539.12.04

ОЦЕНКА ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК У ПРИРОДНЫХ ПОПУЛЯЦИЙ ЯЩЕРИЦ, ОБИТАЮЩИХ В ЕСТЕСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ НА ТЕХНИЧЕСКИХ ПЛОЩАДКАХ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ПОЛИГОНА

А. В. Паницкий*, А. О. Айдарханов, Н. Ж. Кадырова

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

** E-mail для контактов: Panitskiy@nnc.kz*

В статье представлены результаты оценки дозовых нагрузок у природной популяции прытких ящериц (*Lacerta agilis Linnaeus*), обитающих в естественных условиях хронического воздействия различной мощности ионизирующих излучений на испытательных площадках Семипалатинского испытательного полигона. Установлено, что прыткая ящерица может уверенно служить индикатором радионуклидного загрязнения биоты на площадках СИП по содержанию техногенных радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr. Расчеты дозовых нагрузок на ящериц свидетельствуют, что на разных исследованных технических площадках СИП, имеющих исторически различную степень радионуклидного загрязнения в зависимости от вида, мощности и характера проведенных взрывов, дозовая нагрузка на ящериц, являющихся индикаторами радионуклидного загрязнения среды обитания, существенно разнится. На технических площадках «Дегелен», «Балапан» подавляющая ее часть сформирована исключительно за счет внешнего облучения ^{137}Cs. На площадке «4А», где в свое время проведены испытания боевых радиоактивных веществ (так называемых «рецептур») наибольшие мощности дозы облучения для прыткой ящерицы зафиксированы до $2{,}2\cdot10^{-2}$ Гр/сут и сформирована она совсем иначе, чем в предыдущих площадках – только за счет внутреннего облучения от ^{90}Sr.

Ключевые слова: *радиоэкология, радиобиология, ящерицы, дозовые нагрузки, Семипалатинский полигон.*

Введение

В настоящее время изучение последствий испытаний ядерного оружия на территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП) и разносторонние комплексные исследования их влияния на биологические системы и окружающую среду в целом находятся в ряду наиболее актуальных проблем и приобретают свое рациональное решение [1–3].

Особую актуальность представляет изучение радиобиологических особенностей у популяций дикорастущих растений и диких животных в результате длительного хронического воздействия различных доз ионизирующих излучений на территории СИП [4–8].

Считается, что даже по истечении более 20 лет после закрытия СИП многие его участки еще не могут использоваться для нужд народного хозяйства, так как отдельные территории полигона загрязнены техногенными радионуклидами ^{137}Cs, ^{90}Sr, $^{239+240}$Pu [9, 10].

Вопросы оценки возможного биоэкологического ущерба, причиненного природным популяциям растений и животных в результате загрязнения территории полигона техногенными радиоактивными веществами, имеют огромное практическое значение и представляют большой теоретический интерес. Остро встает вопрос о возможности адаптации популяции высших организмов к долговременному ионизирующему облучению на территории полигона.

Расчет дозовых нагрузок на население, персонал, биоту довольно широко применяется в мире и Ближнем зарубежье, в частности, в России, Беларуси и др. В Казахстане ранее мы не наблюдали эти работы и только в настоящее время имеются отдельные исследования [11–13].

В условиях возможности ведения хозяйственной деятельности на территории СИП с учетом ее выявленных особенностей, а также проводимых и планируемых работ по реабилитации определенных радиоактивно–загрязненных участков СИП определение дозовых нагрузок на население, персонал, биоту приобретает особую актуальность. Наиболее показательны, в качестве объекта исследования являются представители биоты, имеющие тесный контакт с почвой, являющейся наиболее загрязненным компонентом природных экосистем, подверженных радиоактивному загрязнению на территории СИП. Одним из таких объектов является прыткая ящерица (*Lacerta agilis Linnaeus*).

В связи с вышеизложенным, цель данных исследований – определение дозовых нагрузок у природной популяции прыткой ящерицы (*Lacerta agilis L.*), обитающей на различных испытательных участках СИП.

1. Материалы и методы

1.1. Объект исследования

Объект исследования: природные популяции ящериц, обитающих на различных площадках СИП. По результатам ранее проведенных рекогносцировочных экспедиционно–полевых работ, выбран представитель семейства *Lacertidae* – прыткая ящерица (*Lacerta agilis Linnaeus*), распространённая на территории СИП практически повсеместно. Биологические особенности этого вида хорошо изучены. Радиус активности этих животных составляет около 40 м [14, 15]. В качестве убежища могут готовить припо-

верхностные норы, использовать норы других животных, пустоты, пни, а также дупла. На территории СИП, кроме природных ландшафтов прыткая ящерица населяет и зоны с антропогенной нагрузкой. Питается, в основном, насекомыми, в том числе и личинками. Могут поедать собственный молодняк и молодых ящериц других видов. При кормлении часто могут заглатывать почвенные частицы, содержащие радионуклиды.

1.2. Проведение полевых работ

Для проведения радиоэкологических исследований организованы экспедиционно-полевые выезды на разные исследуемые участки испытательных площадок СИП и на фоновые территории. Радиологические методы заключались в проведении радиологической съемки местности, с определением дозиметрических характеристик [17], отборе проб почвы, отлове животных на изучаемых участках полигона для радионуклидных анализов.

1.2.1. Отлов животных

Рептилии добывались методом медленного подкрадывания и, по приближению, быстрого накрывания ящериц сачком. Отлов животных проводился на следующих участках:

– «условно-фоновые», расположенные на территории СИП вне испытательных площадок полигона. Удельная активность радионуклидов в верхнем слое почвы в местах отлова ящериц на «фоновых» территориях не превышала для ^{137}Cs – 15 Бк/кг, ^{90}Sr – 20 Бк/кг. С участков отловлено 10 особей;

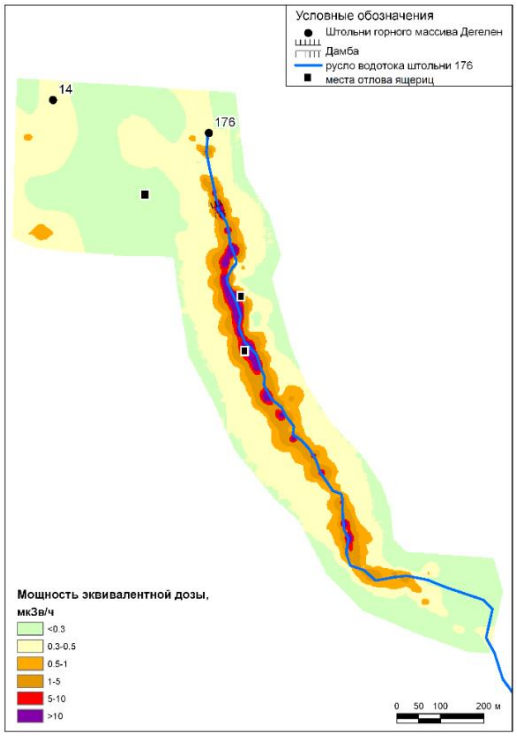


Рисунок 1. Экосистемы отлова рептилий на берегах водотока из штольни № 176 горного массива «Дегелен»

– берега водотока из штольни № 176 испытательной площадки «Дегелен», где проводились подземные испытания ядерного оружия в горизонтальных горных выработках – штольнях. Вследствие выноса радионуклидов с водой из полостей испытательной штольни № 176, русло и берега водотока имеют различные уровни загрязнения радионуклидами (рисунок 1). Максимальная удельная активность в почве для ^{137}Cs достигает порядков $2{,}0 \cdot 10^6$ Бк/кг, для ^{90}Sr – $5{,}0 \cdot 10^5$ Бк/кг [17]. С участка отловлено 8 особей;

– участок технической площадки «Дегелен», не сопряженный с радиоактивным водотоком (≈200 м от водотока). Удельная активность радионуклидов на данном участке соответствует фону площадки «Дегелен»», и близки к глобальным выпадениям в почвах северных полушарий [18]. Удельная активность радионуклида ^{137}Cs на участках отлова составила 30 Бк/кг, ^{90}Sr – 20 Бк/кг. С участка отловлено 9 особей;

– «Атомное озеро», образованное в результате проведения экскавационного ядерного взрыва. Максимальные значения удельной активности радионуклидов в почве отвалов озера и прилегающей территории достигают по ^{137}Cs – $3 \cdot 10^4$ Бк/кг, ^{90}Sr – $8{,}5 \cdot 10^3$ Бк/кг. Для исследований отлов ящериц проводился на участке, расположенном в 250 м от отвалов «Атомного озера» в северо-западном направлении (рисунок 2) [19]. С участка отловлено 9 особей;

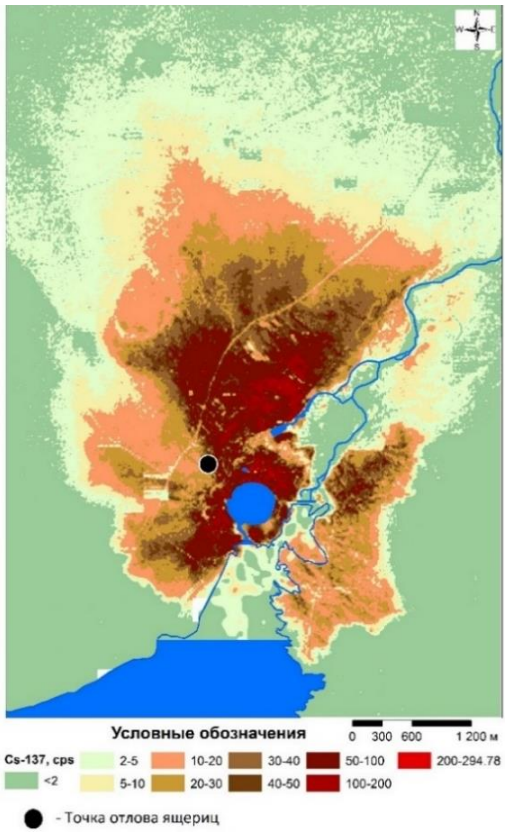


Рисунок 2. Экосистемы отлова рептилий в 250 м от «Атомного озера».

– техническая площадка «4А», на которой испытывали боевые радиоактивные вещества. На площадке имеется 25 участков радиоактивного загрязнения [20]. Отлов ящериц проведен на 7-и участках с содержанием ^{90}Sr в почве, достигающим $9{,}0\cdot10^{8}$ Бк/кг и ^{137}Cs, достигающим $3{,}1\cdot10^{4}$ Бк/кг. С участка отловлено 11 особей.

Всего для проведения радионуклидных анализов отловлено 47 особей. Все особи добыты за один полевой экспедиционный выезд (третья декада августа – первая декада сентября).

1.2.2. Измерение радиационных параметров природной среды

Использованы радиологические, спектрометрические и радиохимические методы исследования [21–25].

Измерение МЭД внешнего γ-излучения проводилось по [21, 22], диапазон измерений прибора находился в пределах 0,1–999 мкЗв/ч, основная погрешность измерений составляет ±20%. Плотность потока β-частиц определялась дозиметром-радиометром МКС-АТ6130. Диапазон измерения плотности потока β-частиц – $10^{-1}\cdot10^{4}$ част/(мин·см^2), предел допускаемой основной относительной погрешности измерений ±20%.

Определение координат проводили навигационным прибором «Garmin», географическая система координат – WGS 84.

1.3. Проведение лабораторных работ

Лабораторные анализы на содержание радионуклидов проводились во всей тушке отловленных ящериц, при этом вес ящериц изменялся в пределах 5–13 грамм, средний вес составил около 7 грамм. Определение удельной активности в теле ящериц и почвенном покрове описано в наших работах ранее [7, 17].

1.4. Оценка дозовых нагрузок

Оценка дозовых нагрузок на животных проводилась по [26, 27]. Использована методика оценки дозовых нагрузок у различных видов животных природной популяции.

Суммарная мощность дозы облучения ящериц определялась по формуле:

$$D_j = \sum_i D_{i,j}^{внутр} + D_{i,j}^{внеш}$$

где: D_j – суммарная мощность дозы облучения j-го референтного объекта; $D_{i,j}^{внутр}$ – мощность дозы внутреннего облучения объекта $D_{i,j}$ от всех рассматриваемых радионуклидов i; $D_{i,j}^{внеш}$ – мощность дозы внешнего облучения объекта $D_{i,j}$ от всех рассматриваемых радионуклидов i.

Дозовая нагрузка на j-референтный вид биоты (D_j), полученная в единицу времени (сутки), измерялась в мкГр/сут, и алгоритм ее вычисления, в общем виде, следующий:

$$D_{i,j}^{внешн} = DCF_{ji}^{soil} \cdot f_j^{soil} \cdot C_i^{soil} + DCF_{ji}^{soil_pl} \cdot f_j^{soil_pl} \cdot \sigma_i$$

$$D_{i,j}^{внутр} = \left(CR_{ji}^{soil} \cdot f_j^{soil} \cdot C_i^{soil} + CR_{ji}^{soil} \cdot f_j^{soil_pl} \cdot C_i^{soil}\right) \cdot DC_{ji}$$

где DCF_{ji}^{soil} – коэффициент перехода от концентрации в почве i-го радионуклида к дозе внешнего облучения j-го вида биоты, (мкГр/сут)·(Бк/кг)$^{-1}$; f_j^{soil} – доля времени, проводимая j-м видом биоты в почве, отн. единицы; C_i^{soil} – концентрация i-го радионуклида в почве, Бк/кг; $DCF_{ji}^{soil_pl}$ – коэффициент перехода от плотности i-го радионуклида на поверхности почвы (глубина до 5 см) к дозе внешнего облучения j-го вида биоты, (мкГр/сут)·(Бк/м^2)$^{-1}$; $f_j^{soil_pl}$ – доля времени, проводимая j-м видом биоты на поверхности земли, отн. единицы; σ_i – плотность i-го радионуклида на поверхности почвы, Бк/м^2; CR_{ji}^{soil} – коэффициент перехода i-го радионуклида из почвы в организм j-го вида биоты, (Бк/кг живого веса организма)·(Бк/кг сух. веса почвы)$^{-1}$; DC_{ji} – дозовый коэффициент перехода от активности в теле j-го организма к дозе внутреннего облучения от i-го радионуклида, (мкГр/сут)·(Бк/кг живого веса организма)$^{-1}$.

При расчете, ввиду отсутствия коэффициентов для расчета дозовой нагрузки для ящерицы прыткой (*Lacerta agilis Linnaeus*), использовались коэффициенты для наиболее близкого к ней референтного вида – ужа обыкновенного (*Natrix natrix*), который также, как и ящерица прыткая, относится к типу хордовые (*Hordata*), классу пресмыкающиеся или рептилии (*Reptilia*), отряду чешуйчатые (*Squamata*). Уж обыкновенный (*Natrix natrix*), ведет приземный образ жизни, схожий с образом жизни ящерицы прыткой (*Lacerta agilis Linnaeus*).

2. Результаты и обсуждение

Прежде всего, для оценки дозовых нагрузок, получаемых представителями биоты, необходимо иметь четкое представление о текущем радиоактивном загрязнении изучаемой местности. Поэтому, одной из основных задач является определение содержания основных техногенных загрязнителей местности – радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в компонентах природной среды (ящерицы, почва).

2.1. Удельная активность радионуклида ^{137}Cs

Результаты измерений удельной активности радионуклида ^{137}Cs в теле ящериц и в почве места их отлова ранее представлены в работе авторов [7]. В тушках ящериц, отловленных на «фоновых» участках СИП, удельная активность радионуклида ^{137}Cs находилась в диапазоне 8–10 Бк/кг. В особях ящериц, обитающих около штольни № 176, содержание техногенного радионуклида ^{137}Cs отмечалось в диапазоне 330–610 Бк/кг, только в одной тушке удельная активность была на порядок ниже – 94 Бк/кг. Основное радиоактивное загрязнение территории отлова приурочено к руслу водотока штольни № 176 [17]. Средняя концентрация ^{137}Cs в почве на участке отлова составляла $2{,}0\cdot10^{5}$ Бк/кг.

При удалении от радиоактивного водотока на пару сотен метров концентрация ^{137}Cs в ящерицах резко

падает. Это можно объяснить низким радиусом активности ящериц, составляющим около 40 м [14, 15]. Так, на участках площадки «Дегелен», не сопряженных с радиоактивно-загрязненными водотоками, удельная активность ^{137}Cs в теле ящериц уже не превышала 50 Бк/кг. Удельная активность ^{137}Cs в почве в месте отлова этих ящериц не превышала 30 Бк/кг. В тушках ящериц, отловленных в 250 м от «Атомного озера» в северо-западном направлении, содержание ^{137}Cs изменялось от 4 до 51 Бк/кг несмотря на то, что при этом удельная активность ^{137}Cs в почве участка отлова пресмыкающихся достигала $3{,}0\cdot10^{4}$ Бк/кг. Среднее значение удельной активности ^{137}Cs в ящерицах составило 21 Бк/кг. Количественные значения удельной активности ^{137}Cs в тушках ящериц площадки «4А» отмечены только в животных, отловленных на участках № 20, 13, 24 [7]. В почвах этих участков ^{137}Cs фиксировался до $1{,}4\cdot10^{4}$ Бк/кг; $8{,}6\cdot10^{2}$ Бк/кг и $4{,}8\cdot10^{4}$ Бк/кг, соответственно.

2.2. Удельная активность радионуклида ^{90}Sr

Результаты измерений удельной активности ^{90}Sr в теле ранее представлены в работе авторов [6]. Удельная активность ^{90}Sr в организме ящериц, отловленных с различных участков СИП, сильно варьирует в зависимости от места обитания. Так, на «фоновых» участках СИП, удельная активность ^{90}Sr в двух объединенных образцах (по 6 ящериц в каждом) не превысила 60 Бк/кг. В районе «Атомного озера» значения содержания радионуклида ^{90}Sr в ящерицах изменялись в пределах 72–110 Бк/кг, тогда как в почве участка отлова его средняя удельная активность составила $8{,}5\cdot10^{3}$ Бк/кг. На площадке «4А» очень высокие значения удельной активности радионуклида ^{90}Sr отмечены во всех образцах ящериц [7]. Так, в тушках ящериц, отловленных с участка загрязнения № 1, удельная активность ^{90}Sr достигает $7{,}8\cdot10^{5}$ Бк/кг. Наименьшее значение удельной активности ^{90}Sr, зафиксированное на участке № 2, составило $3{,}1\cdot10^{4}$ Бк/кг. В ящерицах, отловленных с территории, прилегающей к штольне № 176, содержание техногенного радионуклида ^{90}Sr не определялось.

2.3. Расчет дозовых нагрузок

Для расчета дозовых нагрузок значения всех необходимых коэффициентов заимствованы из литературных источников [26, 27]. Входными параметрами являются время пребывания в среде обитания и уровни концентрации радионуклидов в почве и организме животных.

Значения дозовых коэффициентов для расчета доз внутреннего и внешнего облучения животных представлены в таблице 1 [26, 27].

*Таблица 1. Значения коэффициентов для расчета дозовой нагрузки ящерицы прыткой**

DC, (мкГр/сут) / (Бк/кг живого веса оранизма)		$DCF_{ji}^{soil_pl}$, (мкГр/сут) / (Бк/м^2)		DCF_{ji}^{soil}, (мкГр/сут) / (Бк/кг)	
^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr
$3{,}8\cdot10^{-3}$	$1{,}5\cdot10^{-2}$	$4{,}3\cdot10^{-5}$	$4{,}1\cdot10^{-11}$	$2{,}9\cdot10^{-3}$	$2{,}6\cdot10^{-9}$

Примечание: ** – значения коэффициентов даны как для ужа обыкновенного (Natrix natrix)*

Доли времени (в относительных единицах), проводимые ящерицей прыткой в почве и на поверхности земли, приняты, соответственно – 0,3 и 0,7. Результаты расчетов мощности дозы внешнего и внутреннего облучения от техногенных радионуклидов ^{137}Cs, ^{90}Sr на технических площадках «Дегелен», «Балапан», «4А» и фоновых территориях СИП представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчетов мощности дозы облучения ящерицы прыткой на площадках «Дегелен», «Балапан», «4А» и фоновых территориях СИП

Испытательная площадка	Участок обитания	Мощность дозы облучения (внешнего), мкГр/сут		Мощность дозы облучения (внутреннего), мкГр/сут		Мощность дозы (суммарная), мкГр/сут
		^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	
СИП	фоновая территория	$4{,}2\cdot10^{-2}$	$7{,}9\cdot10^{-8}$	$1{,}3\cdot10^{-4}$	$3{,}8\cdot10^{-2}$	$8{,}1\cdot10^{-2}$
«Дегелен»	берег водотока из штольни №176	565	—	1,7	—	567
	200 м от водотока	$8{,}5\cdot10^{-2}$	—	$2{,}5\cdot10^{-4}$	—	$8{,}5\cdot10^{-2}$
«Балапан»	«Атомное озеро» / “Atomic Lake”	85	$2{,}3\times10^{-5}$	0,25	11	96
«4А»	участок 1	3	$1{,}9\cdot10^{-2}$	$9{,}2\cdot10^{-3}$	$9{,}3\cdot10^{3}$	$9{,}3\cdot10^{3}$
	участок 2	0,18	$6{,}3\cdot10^{-4}$	$5{,}3\cdot10^{-4}$	305	305
	участок 3	40	$3{,}2\cdot10^{-2}$	0,12	$1{,}5\cdot10^{4}$	$1{,}5\cdot10^{4}$
	участок 5	1,1	$7{,}9\cdot10^{-3}$	$3{,}2\cdot10^{-3}$	$3{,}8\cdot10^{3}$	$3{,}8\cdot10^{3}$
	участок 13	2,4	$1{,}3\cdot10^{-3}$	$7{,}2\cdot10^{-3}$	610	612
	участок 20	48	$4{,}5\cdot10^{-2}$	0,14	$2{,}2\times10^{4}$	$2{,}2\cdot10^{4}$
	участок 24	136	$2{,}1\cdot10^{-3}$	0,40	$1{,}0\times10^{3}$	$1{,}1\cdot10^{3}$

Примечание: *– отсутствуют данные измерений удельной активности изотопа ^{90}Sr*

На территории площадки «Дегелен» максимальная доза облучения составляла 567 мкГр/сут в районе водотока из штольни №176, при этом подавляющая ее часть формировалась за счет внешнего облучения от ^{137}Cs. В районе «Атомного озера» мощность дозы составляла порядка 96 мкГр/сут. Подавляющая часть мощности дозы сформирована внешним облучением от ^{137}Cs. Наибольшие мощности дозы облучения зафиксированы на площадке «4А» вплоть до $2{,}2\cdot10^{4}$ мкГр/сут. Здесь доза сформирована за счет внутреннего облучения от ^{90}Sr.

Критерии в регламентации радиационного воздействия на биоту предложены в работах [26, 28, 29]. Таким образом, рассчитанные нами результаты доз, на фоновой части территории СИП, по данным разных литературных источников, находились в пределах нижнего порогового уровня «предельной дозы». Вместе с тем, на технических площадках «Дегелен», «Балапан» максимальная мощность дозы для ящерицы составила $0{,}6\cdot10^{-3}$ Гр/сут и $0{,}1\cdot10^{-3}$ Гр/сут, соответственно. Согласно [28], полученные нами данные на этих площадках находятся в диапазоне мощности дозы хронического облучения $5\cdot10^{-4}$–0,002 Гр/сут. При длительном хроническом облучении различной интенсивности, что фактически имеет место и является характерным для отдельных территорий СИП, этот диапазон доз, возможно, приводит к появлению слабых эффектов по индуцированию той или иной патологии у чувствительных позвоночных видов. Несколько иная, более выраженная картина, полученной мощности дозы у пресмыкающихся, отмечена на исследованных участках площадки «4А». Так, диапазон рассчитанных доз на участках площадки «4А» составил от $3{,}1\cdot10^{-4}$–$2{,}2\cdot10^{-2}$ Гр/сут. Полученные значения доз на территории площадки «4А» показывают, что на некоторых ее участках полученные мощности дозы хронического облучения могут приводить к сокращению жизни у позвоночных животных, к появлению радиационных эффектов у беспозвоночных животных, согласно данным [29]. Аналогичные данные получены авторами [30]. Показано, что максимальные мощности дозы на территории СИП (площадка «Балапан») со средним уровнем радиоактивного загрязнения (МЭД 0,8–10 мкЗв/ч) для мышевидных грызунов – краснощекого суслика, большого тушканчика и тушканчика–прыгуна составили $2{,}9\cdot10^{-4}$ Гр/сут; $2{,}9\cdot10^{-4}$ Гр/сут и $3{,}1\cdot10^{-4}$ Гр/сут, соответственно. Согласно [28], эти данные могут свидетельствовать о возможности небольшого увеличения цитогенетических эффектов у данных представителей биоты. Авторами [30] также установлено, что при изучении наследственного аппарата хромосом, при использовании цитогенетического анализа хромосом в метафазных клетках животных, у вышеприведенных мышевидных грызунов статистически подтверждено наличие изменений на клеточном уровне.

Заключение

По полученным данным установлено, что прыткая ящерица может уверенно служить индикатором радионуклидного загрязнения биоты на площадках СИП по содержанию техногенных радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr. Расчеты дозовых нагрузок на ящериц свидетельствуют, что на разных исследованных технических площадках СИП, имеющих исторически различную степень радионуклидного загрязнения в зависимости от вида, мощности и характера проведенных взрывов, дозовая нагрузка на ящериц, являющихся индикаторами радионуклидного загрязнения среды обитания, существенно разнится. На технических площадках «Дегелен», «Балапан» подавляющая ее часть сформирована исключительно за счет внешнего облучения ^{137}Cs. На площадке «4А», где в свое время проводились испытания боевых радиоактивных веществ (так называемых «рецептур»), наибольшие мощности дозы облучения для прыткой ящерицы зафиксированы до $2{,}2\cdot10^{-2}$ Гр/сут и сформирована она совсем иначе, чем на предыдущих площадках – только за счет внутреннего облучения от ^{90}Sr.

Финансирование

Данные исследования финансировались Министерством энергетики Республики Казахстан в рамках научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» (ИРН – BR24792713), а также в рамках международного проекта МНТЦ К-759.

Литература

1. Beresford, N.A., M. Balonov, K. Beaugelin-Seiller, J. Brown, D. Copplestone, J.L. Hingston, J. Horyna, A. Hosseini, B.J. Howard, S. Kamboj, T. Nedveckaite, G. Olyslaegers, T. Sazykina, J. Vives i Batlle, T.L. Yankovich and C. Yu., An international comparison of models and approaches for the estimation of the radiological exposure of non-human biota // Appl. Radiat. Isot. – 2008. – Vol. 66(11). P. 1745–1749.
2. Лукашенко С.Н. Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. // Вып. 1. Радиоэкологическое состояние «северной» части территории Семипалатинского испытательного полигона. – Курчатов. – 2010. – 234 с.
3. Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Оптимизация исследований территорий Семипалатинского испытательного полигона с целью их передачи в хозяйственный оборот]: монография / Под. рук. С.Н. Лукашенко. – Павлодар: Дом печати. – 2015. – Вып. 5. – 356 с. ISBN 978–601–7112–99–8.
4. Ларионова Н.В. Накопление искусственных радионуклидов растениями на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона: автореф. дис. … канд. биол. наук: 03.01.01 – радиобиология / Ларионова Наталья Владимировна. – Обнинск. – 2013. – 22 с.
5. Паницкий А.В. Особенности производства сельскохозяйственной продукции на площадке «Дегелен» Семипалатинского испытательного полигона: автореф. дис. … канд. биол. наук: 03.01.01 – радиобиология / Паницкий Андрей Васильевич – Обнинск. – 2013. – 24 с.

6. Мозолин Е.М., Гераськин С.А., Минкенова К.С. Радиобиологические эффекты у растений и животных Семипалатинского испытательного полигона (Казахстан). / Радиационная биология. Радиоэкология. – 2008. – Т. 48. – № 4. – С.422–431.
7. Panitskiy, A.V., Lukashenko, S.N., Kadyrova, N.Zh. ^{137}Cs and ^{90}Sr in lizards of Semipalatinsk test site. // J. Environ. Radioact. – 2017. – 166P1. –P. 91–96.
8. Кадырова Н.Ж., Паницкий А.В., Айдарханов А.О., Лукашенко С.Н. Содержание радионуклидов в организме мышевидных грызунов, обитающих на участках с различным уровнем радиоактивного загрязнения площадки «Балапан» // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. – 2010. – № 3 (14). – С. 158–169.
9. Panitskiy A.V., Lukashenko S.N., Kadyrova N.Zh. Radionuclides in bodies of wild animals of Semipalatinsk test site. // Book of abstracts of the III International Conference on «Environmental Radioactivity: New Challenges with New Technologies» (ENVIRA2015) (21-29 September 2015), Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki. – 2015. – P. 122.
10. Спиридинов С.И., Мукушева М.К. Семипалатинский испытательный полигон: Радиоэкологические модели и риски. – Алматы. – 2010. – 167 с.
11. Ким Д.С. Радиационная экологическая обстановка в Республике Казахстан в районах расположения реакторов и на территории Семипалатинского испытательного полигона. // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2012. – Т. 52. – № 4. – С. 409–418.
12. Топорова А.В. Оценка граничных параметров радиоактивного загрязнения территорий, гарантирующих непревышение допустимых дозовых нагрузок / Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. Выпуск 5. Оптимизация исследований территорий Семипалатинского испытательного полигона с целью их передачи в хозяйственный оборот / под рук. Лукашенко С.Н. – Павлодар: Дом печати, 2015. – С. 293–308. ISBN 978–601–7112–99–8.
13. Шатров А.Н., Лукашенко С.Н., Жадыранова А.А., Сальменбаев С.Е., Каширский В.В., Байгазинов Ж.А. Оценка ожидаемых дозовых нагрузок от внутреннего поступления техногенных радионуклидов для населения, проживающего в зоне потенциального влияния Семипалатинского испытательного полигона // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстан [Сб. тр. Национального ядерного центра РК за 2014-2016]. – Павлодар: Дом печати, 2017. – Т. 2. – Вып. 6. – С. 223–240. ISBN 978–601–7844–54–7.
14. Лукашенко С.Н., Битенова М.М., Кадырова Н.Ж., Апсаликов К.Н., Белихина Т.И., Полешко А.Н., Каширский В.В., Минкенова К.С., Шатров А.Н., Жадыранова А.А., Ларионова Н.В., Топорова А.В., Мамырбаева А.Н., Каримбаева К.С., Кожаханов Т.Е., Байгазинов Ж.А. Реконструкция дозовых нагрузок населения Азгирского региона для оценки последствий ядерных испытаний // тез. докл. V Междунар. науч.-практ. конф. «Медико-биологические и радиоэкологические проблемы в уранодобывающих регионах», 19-20 июня 2014 г., г. Астана. – Астана. – 2014, – С. 27–28. ISBN 978–601–244–231–1.
15. Хромов В.А. Позвоночные животные Семипалатинского региона. // Вестник Университета «Семей». – 1999. – № 5–6. – С. 56–65.
16. Яблоков А. В., Баранов А. С., Розанов А. С. Популяционная структура, географическая изменчивость и микрофизиогенез песчаной ящерицы (Lacerta agilis). // Эволюционная биология. – 1991. – № 121. – 27 с.
17. Panitskiy A.V., Lukashenko S.N. Nature of radioactive contamination of components of ecosystems of streamflows from tunnels of Degelen massif // Journal of Environmental Radioactivity. – 2015. P. 32–40.
18. Коровикова Т.В., Мустафина Е.В., Осинцев А.Ю., Дмитропавленко В.Н., Яковенко Ю.Ю. Влияния проведенных работ по созданию дополнительной защиты инженерных сооружений штолен горного массива «Дегелен» на радиационную обстановку припортальных участков. // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Сб. тр. Института радиационной безопасности и экологии за 2007–2009 гг.]. – 2010. – Вып. 2. – С. 157–202. ISBN 978–601–7112–28–8.
19. Комплексное изучение миграции радионуклидов в экосистемах различных ландшафтов Семипалатинского полигона, подвергшихся ядерным испытаниям разного характера: отчет о НИР (заключительный) за 2014 гг. / Институт радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК (ИРБЭ НЯЦ РК), рук. С.Н. Лукашенко, А.В. Паницкий, А.О. Айдарханов – Курчатов: ИРБЭ НЯЦ РК. – 2014.– 92 с. – № ГР 0112РК00543 – Инв. № 0214РК02967 от 08.12.2014.
20. Кундузбаева А.Е., Осинцев А.Ю., Лукашенко С.Н., Магашева Р.Ю. Формы нахождения искусственных радионуклидов в почвах испытательной площадки боевых радиоактивных веществ // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Сб. тр. Национального ядерного центра РК за 2011-2012 г.] / под рук. Лукашенко С.Н. – Павлодар: Дом печати. – 2013. – Т.2. – Вып. 4. – С. 167–180. ISBN 978–601–7112–74–5.
21. Методика выполнения измерений. Госстандарт, 1993 г., инв. № 92.
22. Руководство по эксплуатации дозиметра радиометра МКС-АТ6130.
23. Дозиметры радиометры МКС-АТ6130, МКС-АТ6130А, МКС-АТ6130В. Руководство по эксплуатации. АТОМТЕХ Научно–производственное унитарное предприятие. – 84 с.
24. Активность радионуклидов в объемных образцах. Методика выполнения измерений на γ-спектрометре: МИ 2143-91. - Введ. 1998-06-02. - Рег. № 5.06.001.98. – М.: НПО ВНИИФТРИ. – 1991. – 17 с.
25. Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды. – Введ. 1999. – Рег. №5.05.008.99.
26. Практические рекомендации по вопросам оценки радиационного воздействия на человека и биоту. Под общей редакцией И.И. Линге и И.И. Крышева. – Москва. – 2015. – 265 с.
27. ICRP (2008) “Environmental protection: the concept and use of Reference Animals and Plants. ICRP Publication 108”, Annals of the ICRP 38 (4-6).
28. Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. Радиационная безопасность окружающей среды: необходимость гармонизации российских и международных нормативно-методических документов с учетом требований федерального законодательства и новых международных основных норм безопасности ОНБ-2011. // Радиация и риск. – 2013. – Т. 22. – №1. – С. 47–61.

29. Andersson P., Beaugelin-Seiller K., Beresford Nick, Copplestone D., Della Vedova C., Garnier-Laplace J., Howard B., Howe P., Oughton D. H., Wells C., Whitehouse P. Numerical benchmarks for protecting biota from radiation in the environment: proposed levels, underlying reasoning and recommendations. PROTECT Deliverable 5. EC contract number: 036425 (FI6R). –2008. – 112 p.
30. Кадырова Н.Ж., Жапбасов Р. Радиобиологические и цитогенетические аспекты последствий хронического воздействия ионизирующих излучений Семипалатинского испытательного полигона на природные популяции растений и животных: монография. – Павлодар: ТОО «Дом печати». – 2019. – 312 с.

REFERENCES

1. Beresford, N.A., M. Balonov, K. Beaugelin-Seiller, J. Brown, D. Copplestone, J.L. Hingston, J. Horyna, A. Hosseini, B.J. Howard, S. Kamboj, T. Nedveckaite, G. Olyslaegers, T. Sazykina, J. Vives i Batlle, T.L. Yankovich and C. Yu., An international comparison of models and approaches for the estimation of the radiological exposure of non-human biota // Appl. Radiat. Isot. – 2008. – Vol. 66(11). P. 1745–1749.
2. Lukashenko S.N. Aktual'nye voprosy radioekologii Kazakhstana. // Issue 1. Radioekologicheskoe sostoyanie «severnoy» chasti territorii Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona. – Kurchatov. – 2010. – 234 p.
3. Aktual'nye voprosy radioekologii Kazakhstana [Optimizatsiya issledovaniy territoriy Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona s tsel'yu ikh peredachi v khozyaystvennyy oborot]: monografiya / Pod. ruk. S.N. Lukashenko. – Pavlodar: Dom pechati. – 2015. – Issue 5. – 356 p. ISBN 978–601–7112–99–8.
4. Larionova N.V. Nakoplenie iskusstvennykh radionuklidov rasteniyami na territorii byvshego Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona: avtoref. dis. … kand. biol. nauk: 03.01.01 – radiobiologiya / Larionova Natal'ya Vladimirovna. – Obninsk. – 2013. – 22 p.
5. Panitskiy A.V. Osobennosti proizvodstva sel'skokhozyaystvennoy produktsii na ploshchadke “Degelen” Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona: avtoref. dis. … kand. biol. nauk: 03.01.01 – radiobiologiya / Panitskiy Andrey Vasil'evich – Obninsk. – 2013. – 24 p.
6. Mozolin E.M., Geras'kin S.A., Minkenova K.S. Radiobiologicheskie effekty u rasteniy i zhivotnykh Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona (Kazakhstan). / Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. – 2008. – Vol. 48. – No. 4. – P. 422–431.
7. Panitskiy, A.V., Lukashenko, S.N., Kadyrova, N.Zh. ^{137}Cs and ^{90}Sr in lizards of Semipalatinsk test site. // J. Environ. Radioact. – 2017. – 166P1. – P. 91–96.
8. Kadyrova N.Zh., Panitskiy A.V., Aydarkhanov A.O., Lukashenko S.N. Soderzhanie radionuklidov v organizme myshevidnykh gryzunov, obitayushchikh na uchastkakh s razlichnym urovnem radioaktivnogo zagryazneniya ploshchadki “Balapan” // Problemy biogeokhimii i geokhimicheskoy ekologii. – 2010. – № 3 (14). – S. 158–169.
9. Panitskiy A.V., Lukashenko S.N., Kadyrova N.Zh. Radionuclides in bodies of wild animals of Semipalatinsk test site. // Book of abstracts of the III International Conference on “Environmental Radioactivity: New Challenges with New Technologies” (ENVIRA2015) (21-29 September 2015), Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki. – 2015. – P. 122.
10. Spiridinov S.I., Mukusheva M.K. Semipalatinskiy ispytatel'nyy poligon: Radioekologicheskie modeli i riski. – Almaty. – 2010. – 167 p.
11. Kim D.S. Radiatsionnaya ekologicheskaya obstanovka v Respublike Kazakhstan v rayonakh raspolozheniya reaktorov i na territorii Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona. // Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. – 2012. – Vol. 52. – No. 4. – P. 409–418.
12. Toporova A.V. Otsenka granichnykh parametrov radioaktivnogo zagryazneniya territoriy, garantiruyushchikh neprevyshenie dopustimykh dozovykh nagruzok / Aktual'nye voprosy radioekologii Kazakhstana. Issue 5. Optimizatsiya issledovaniy territoriy Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona s tsel'yu ikh peredachi v khozyaystvennyy oborot / pod ruk. Lukashenko S.N. – Pavlodar: Dom pechati, 2015. – P. 293–308. ISBN 978–601–7112–99–8.
13. Shatrov A.N., Lukashenko S.N., Zhadyranova A.A., Sal'menbaev S.E., Kashirskiy V.V., Baygazinov Zh.A. Otsenka ozhidaemykh dozovykh nagruzok ot vnutrennego postupleniya tekhnogennykh radionuklidov dlya naseleniya, prozhivayushchego v zone potentsial'nogo vliyaniya Cemipalatinskogo ispytatel'nogo poligona // Aktual'nye voprosy radioekologii Kazakhstan [Sb. tr. Natsional'nogo yadernogo tsentra RK za 2014-2016]. – Pavlodar: Dom pechati, 2017. – Vol. 2. – Issue 6. – P. 223–240. ISBN 978–601–7844–54–7.
14. Lukashenko S.N., Bitenova M.M., Kadyrova N.Zh., Apsalikov K.N., Belikhina T.I., Poleshko A.N., Kashirskiy V.V., Minkenova K.S., Shatrov A.N., Zhadyranova A.A., Larionova N.V., Toporova A.V., Mamyrbaeva A.N., Karimbaeva K.S., Kozhakhanov T.E., Baygazinov Zh.A. Rekonstruktsiya dozovykh nagruzok naseleniya Azgirskogo regiona dlya otsenki posled-stviy yadernykh ispytaniy // tez. dokl. V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. “Mediko-biologicheskie i radio-ekologicheskie problemy v uranodobyvayushchikh regionakh”, June 19–20, 2014, Astana. – Astana. – 2014. – P. 27–28. ISBN 978–601–244–231–1.
15. Khromov V.A. Pozvonochnye zhivotnye Semipalatinskogo regiona. // Vestnik Universiteta «Semey». – 1999. – No. 5–6. – P. 56–65.
16. Yablokov A. V., Baranov A. S., Rozanov A. S. Populyatsionnaya struktura, geograficheskaya izmenchivost' i mikrofiziogenez peschanoy yashcheritsy (Lacerta agilis). // Evolyutsionnaya biologiya. – 1991. – No. 121. – 27 p.
17. Panitskiy A.V., Lukashenko S.N. Nature of radioactive contamination of components of ecosystems of stream-flows from tunnels of Degelen massif // Journal of Environmental Radioactivity. – 2015. P. 32–40.
18. Korovikova T.V., Mustafina E.V., Osintsev A.Yu., Dmitropavlenko V.N., Yakovenko Yu.Yu. Vliyaniya provedennykh rabot po sozdaniyu dopolnitel'noy zashchity inzhenernykh sooruzheniy shtolen gornogo massiva “Degelen” na radiatsionnuyu obstanovku priportal'nykh uchastkov // Aktual'nye voprosy radioekologii Kazakhstana [Sb. tr. Instituta radiatsionnoy bezopasnosti i ekologii za 2007–2009 gg.]. – 2010. – Issue 2. – P. 157–202. ISBN 978–601–7112–28–8
19. Kompleksnoe izuchenie migratsii radionuklidov v ekosistemakh razlichnykh landshaftov Semipalatinskogo poligona, podvergshikhsya yadernym ispytaniyam raznogo kharaktera: otchet o NIR (zaklyuchitel'nyy) za 2014 gg. / Institut radiatsionnoy bezopasnosti i ekologii

NYaTs RK (IRBE NYaTs RK), ruk. S.N. Lukashenko, A.V. Panitskiy, A.O. Aydarkhanov – Kurchatov: IRBE NYaTs RK. – 2014.– 92 p. – No. GR 0112RK00543 – Inv. No. 0214RK02967 ot 08.12.2014.
20. Kunduzbaeva A.E., Osintsev A.Yu., Lukashenko S.N., Magasheva R.Yu. Formy nakhozhdeniya iskusstvennykh radionuklidov v pochvakh ispytatel'noy ploshchadki boevykh radioaktivnykh veshchestv // Aktual'nye voprosy radioekologii Kazakhstana [Sb. tr. Natsional'nogo yadernogo tsentra RK za 2011-2012 g.] / pod ruk. Lukashenko S.N. – Pavlodar: Dom pechati. – 2013. – Vol. 2. – Issue 4. – P. 167–180. ISBN 978–601–7112–74–5
21. Metodika vypolneniya izmereniy. Gosstandart, 1993 g., inv. No. 92.
22. Rukovodstvo po ekspluatatsii dozimetra radiometra MKS-AT6130.
23. Dozimetry radiometry MKS-AT6130, MKS-AT6130A, MKS-AT6130V. Rukovodstvo po ekspluatatsii. ATOMTEX Nauchno–proizvodstvennoe unitarnoe predpriyatie. – 84 p.
24. Aktivnost' radionuklidov v ob"emnykh obraztsakh. Metodika vypolneniya izmereniy na γ-spektrometre: MI 2143-91. - Vved. 1998-06-02. - Reg. No. 5.06.001.98. – Moscow: NPO VNIIFTRI. – 1991. – 17 p.
25. Metodicheskie rekomendatsii po sanitarnomu kontrolyu za soderzhaniem radioaktivnykh veshchestv v ob"ektakh vneshney sredy. – Vved. 1999. – Reg. No. 5.05.008.99.
26. Prakticheskie rekomendatsii po voprosam otsenki radiatsionnogo vozdeystviya na cheloveka i biotu. Pod obshchey redaktsiey I.I. Linge i I.I. Krysheva. – Moscow. – 2015. – 265 p.
27. ICRP (2008) “Environmental protection: the concept and use of Reference Animals and Plants. ICRP Publication 108”, Annals of the ICRP 38 (4-6).
28. Kryshev I.I., Sazykina T.G. Radiatsionnaya bezopas-nost' okruzhayushchey sredy: neobkhodimost' garmonizatsii rossiyskikh i mezhdunarodnykh normativno-metodicheskikh dokumentov s uchetom trebovaniy federal'nogo zakonodatel'stva i novykh mezhdunarodnykh osnovnykh norm bezopasnosti ONB-2011. // Radiatsiya i risk. – 2013. – Vol. 22. – No. 1. – P. 47–61.
29. Andersson P., Beaugelin-Seiller K., Beresford Nick, Copplestone D., Della Vedova C., Garnier-Laplace J., Howard B., Howe P., Oughton D. H., Wells C., Whitehouse P. Numerical benchmarks for protecting biota from radiation in the environment: proposed levels, underlying reasoning and recommendations. PROTECT Deliverable 5. EC contract number: 036425 (FI6R). –2008. – 112 p.
30. Kadyrova N.Zh., Zhapbasov R. Radiobiologicheskie i tsitogeneticheskie aspekty posledstviy khronicheskogo vozdeystviya ioniziruyushchikh izlucheniy Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona na prirodnye populyatsii rasteniy i zhivotnykh: monografiya. – Pavlodar: TOO “Dom pechati”. – 2019. – 312 p.

СЕМЕЙ ПОЛИГОНЫНЫҢ ТЕХНИКАЛЫҚ АЛАҢДАРЫНДА ТАБИҒИ ЖАҒДАЙДА МЕКЕНДЕЙТІН КЕСІРТКЕЛЕРДІҢ ТАБИҒИ ПОПУЛЯЦИЯЛАРЫНДАҒЫ ДОЗАЛЫҚ ЖҮКТЕМЕЛЕРДІ БАҒАЛАУ

А. В. Паницкий*, А. О. Айдарханов, Н. Ж. Кадырова

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

** Байланыс үшін E-mail: Panitskiy@nnc.kz*

Мақалада Семей сынақ полигонының сынақ алаңдарында ионды сәуле шығарудың әр түрлі қуаттылығының созылмалы әсер етуінің табиғи жағдайларында мекендейтін секіргіш кесірткелердің (*Lacerta agilis Linnaeus*) табиғи популяциясындағы дозалық жүктемелерді бағалау нәтижелері келтірілген. Секіргіш кесіртке ^{137}Cs және ^{90}Sr техногендік радионуклидтердің құрамы бойынша ССП алаңдарында биотаның радионуклидтік ластануының индикаторы ретінде сенімді қызмет ете алатыны анықталды.

Кесірткелердің дозалық жүктемелерін есептеу барысында, радионуклидтік ластануы тарихи әртүрлі дәрежедегі ССП-ның зерттелген әртүрлі техникалық алаңдарында жүргізілген жарылыстардың түріне, қуатына және сипатына байланысты тіршілік ету ортасының радионуклидтік ластануының индикаторы болып табылатын кесірткелердегі дозалық жүктеменің де айтарлықтай ерекшеленетінін көрсетеді.

«Дегелен», «Балапан» техникалық алаңдарында оның басым бөлігі тек ^{137}Cs сыртқы сәулелену есебінен қалыптасқан. «4А» алаңында, бір кездері әскери радиоактивті заттектердің («рецептуралар» деп аталған) сынағы жүргізілген жерде, секіргіш кесіртке үшін сәулелену дозасының ең жоғары қуаты $2{,}2 \cdot 10^{-2}$ Гр/тәул дейін тіркелген және ол алдыңғы алаңдарға қарағанда – тек қана ^{90}Sr-ден ішкі сәулелену есебінен мүлдем басқаша қалыптасқан.

Түйін сөздер: *радиоэкология, радиобиология, дозалық жүктемелер, Семей полигоны.*

ASSESSMENT OF DOSE LOADS ON NATURAL LIZARD POPULATIONS INHABITING UNDER NATURAL CONDITIONS AT THE TECHNICAL SITES OF THE SEMIPALATINSK TEST SITE

A. V. Panitskiy*, A. O. Aidarkhanov, N. Zh. Kadyrova

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

** E-mail for contacts: Panitskiy@nnc.kz*

This article presents results of dose loads on the natural population of sand lizards (*Lacerta agilis Linnaeus*) inhabiting under natural conditions of chronic exposure to various levels of ionizing radiation at the test locations of the Semipalatinsk Test Site. It was established that a sand lizard can be an essential indicator of radioactive contamination of biota at the STS sites with man-made radionuclides ^{137}Cs and ^{90}Sr. Calculations of dose loads on lizards indicate that at the different surveyed STS technical sites with historically various levels of radioactive contamination, depending on the type, yield and pattern of conducted tests, dose loads on lizards varies essentially. At the "Degelen" and "Balapan" technical sites, the bulk was formed solely due to external exposure to ^{137}Cs. At the "4A" site, where tests of radiological warfare agents (so–called "formulations") were conducted at the time, the highest radiation dose rates for the sand lizard were recorded to be up to $2.2 \cdot 10^{-2}$ Gy/day. In addition, it is quite different from previous sites – only due to internal exposure to ^{90}Sr.

Keywords: *radioecology, lizards, dose loads, Semipalatinsk test site.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-153-159
УДК 502.51:502.3: 550.42 (574.41)

РЕКОГНОСЦИРОВОЧНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ НА ИХ КАЧЕСТВЕННЫЙ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ (с. Бескарагай, область Абай)

А. М. Надеева, А. С. Мамырбаева*, А. К. Айдарханова, Н. В. Ларионова, А. О. Айдарханов, Б. Е. Маден

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

** E-mail для контактов: mamyrbaevaa@nnc.kz*

В работе представлены результаты исследования водных ресурсов села Бескарагай области Абай. В результате проведенных работ получены результаты макро-, микро-компонентных и изотопного составов вод, общих химических показателей. Установлено, что изотопный состав вод (^{2}H и ^{18}O) изменяется в широком диапазоне, и характеризуется постоянным «легким» изотопным составом подземных вод. Исследуемые образцы вод по степени минерализации классифицируются как пресные и слабосолоноватые. По уровню кислотности – нейтральные и слабощелочные. По степени жесткости – мягкие, средней жесткости и жесткие. По ионному составу преобладают воды гидрокарбонатно – сульфатно – хлоридной и натриево – магниево – кальциевой группы.

Ключевые слова: *стабильные изотопы (^{2}H и ^{18}O), изотопная гидрология, атмосферные осадки, подземная вода, поверхностная вода.*

Введение

Республика Казахстан расположена в Центральной Азии и несмотря на запасы полезных ископаемых относится к числу наименее водообеспеченных стран. В результате природной скудности поверхностных вод, количественного и качественного их истощения под влиянием хозяйственной деятельности и происходящих климатических изменений наличные водные ресурсы уже сейчас не удовлетворяют растущие потребности и стали одним из главных факторов, лимитирующих развитие экономики страны, рост благосостояния населения [1–2].

Основные стратегические запасы водных ресурсов страны сконцентрированы в поверхностных и подземных источниках. В целом, распределение водных ресурсов по регионам страны неравномерно. Подземные воды имеют ряд преимуществ перед поверхностными водами, обусловленных лучшей защищенностью их от загрязнения, стабильностью ресурсов и качества во времени, возможностью расположения водозаборов вблизи потребителей и получения воды при меньших затратах [3].

К одному из обеспеченных регионов, где сосредоточено более 40% всех водных запасов Казахстана, относится Восточный регион. Здесь протекает более 800 рек, общая протяженность которых составляет свыше 10 000 км. Главными водными артериями региона является река Иртыш и ее крупные притоки – реки Уба, Ульба, Бухтарма, Курчум, Чар, Кызылсу. На реки Иртыш расположены крупные водохранилища: Усть-Каменогорское (1952 г.), Бухтарминское (1960 г.) и Шульбинское (1976 г.), созданные в результате сооружения гидроэлектростанций. Насчитывается около 2 000 озер площадью от 1 га до 528 кв. км [4–5].

По запасам подземных вод Восточный регион Казахстана входит в тройку, где около 50% ресурсов сосредоточено на юге страны, 30% — в центральном, северном и восточном, и менее 20% — на западе. Разведанные запасы подземных вод формируются за счет восполняемых естественных ресурсов (атмосферные осадки, речной сток и др.) [6].

Для изучения качества водных ресурсов, имеющих важное стратегическое значение, выбраны подземные воды Ишим-Иртышского района, залегающие в области расположения населенного пункта п. Бескарагай. Согласно данным гидрогеологического районирования, Ишим-Иртышский район на территории Восточного региона Казахстана представляет собой часть крупного краевого артезианского бассейна, приуроченного к узкому прогибу палеозойского складчатого фундамента. В пределах данного региона расположена часть этих вод, основная же его площадь занимает территорию Северного Казахстана и юга Западной Сибири. На юге граничит с Центрально-Казахстанским, а на востоке и северо-востоке с Алтайскими гидрогеологическими районами [7].

Одним из основных методов получения информации о происхождении и механизмах образования различных видов вод (подземных и поверхностных) в настоящее время является изотопная гидрология. Так, многочисленными работами во многих регионах мира показано, что задача изучения различных загрязненных водных объектов может быть решена с помощью определения отношения стабильных изотопов ^{2}H и ^{18}O в исследуемой воде [8–11]. Стабильные изотопы ^{18}O и ^{2}H представляют собой почти идеальные индикаторы, которые применяются в гидрологии [12–13].

В рамках проведения рекогносцировочного обследования и для получения данных для дальнейшей оценки влияния атмосферных осадков на качество и количество водных ресурсов были проведены работы по определению макро-, микро-компонентных и изо-

топного составов вод, общих химических показателей поверхностных и подземных вод, а также изотопного состава атмосферных осадков.

Материалы и методы исследования

В качестве водных ресурсов выбрано: 4 поверхностных водоема, 4 скважины с придомовых участков, 2 скважины централизованного водоснабжения, река Иртыш. Отбор проб поверхностных и подземных вод с исследуемых объектов проводился 1 раз в месяц с декабря по май. Отбор атмосферных осадков проводился событийно.

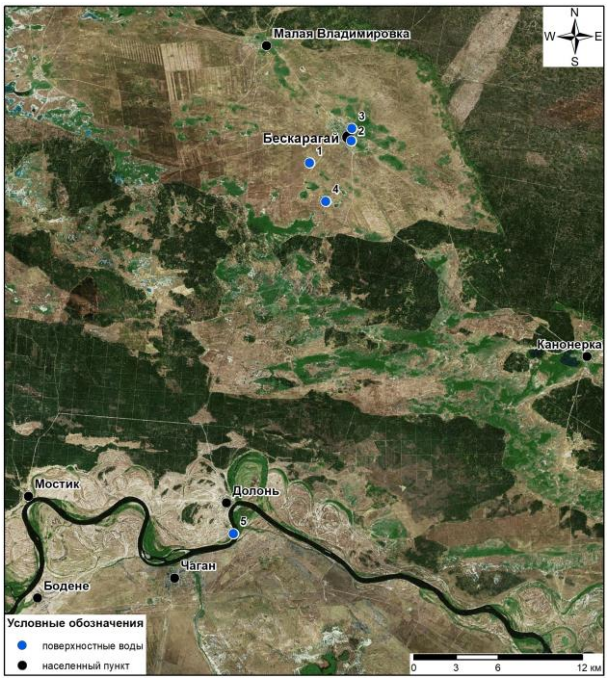
Водоемы представлены отдельными озерами, наличие визуально определяемых притоков и оттоков не обнаружено. Озера представляют собой неглубокие блюдцеобразные впадины и имеют неглубокие котловины с невысокими берегами. Относятся они к малым озерам, ширина и длина озер варьируется в интервалах от 360 до 1 500 м. Глубина озер не превышает 0,7 м. В обследование в качестве поверхностных водоемов также включен участок реки Иртыш, являющийся главной водной артерией региона.

Отбор подземных вод на данный момент проведен со скважин придомовых участков, расположенных на территориях вблизи озер и колодцев центрального водоснабжения. Вода в скважинах с придомовых территорий относится к поровым водам неглубокого залегания – до 5 м. Места расположения объектов показаны на рисунке 1.

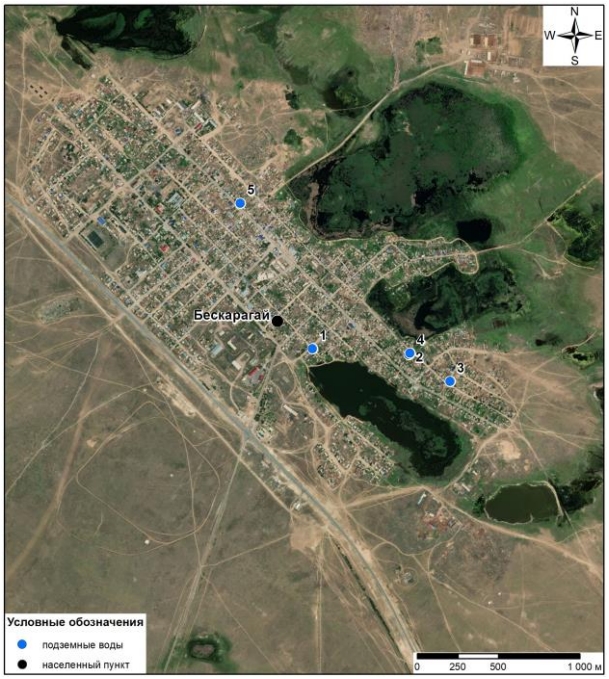
Отбор проб атмосферных выпадений (снег, дождь) осуществлялся согласно разработанной ранее методологии и рекомендациям Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) посредством пробоотборника RAIN SAMPLER 1C (RS-1C) [14–15]. Данная модель пробоотборника предназначена для отбора проб дождя и твёрдых осадков.

Лабораторные работы по определению химического состава воды: органолептических показателей (мутности, цветности, прозрачности), водородного показателя, минерализации, общей жесткости, макроэлементов (Na^++K^+, Ca^+, Mg^+, Cl^-, SO_4^{2-} HCO_3^-+ CO_3^{2-}), микроэлементов (Li, Na, Mg, Al, K, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Ag, Ba, Pb, Bi, Th, U) проводились в соответствии с нормативной документацией на методы выполнения подготовки и анализа [16–18].

Для определения изотопного состава воды применялся метод изотопной гидрологии, который основан на определении соотношений стабильных изотопов поверхностных и подземных вод ($^1H/^2H$; $^{16}O/^{18}O$). Измерения стабильных изотопов проводились на высокочувствительном лазерном спектрометре LGR 912-0008. В качестве внутренних стандартов использовались пробы воды, откалиброванные относительно Международного стандарта VSMOW (МАГАТЭ). Точность измерения ^2H и ^{18}O составила ±1‰ и 0,5‰, соответственно [19].



а)



б)

Рисунок 1. Точки отбора проб воды: поверхностной (а); подземной (б)

Результаты и их обсуждение

Характеристика вод по химическому составу проводилась в соответствии с нормативными документами, принятыми в Республике Казахстан [20–21]. Так, по результатам общего химического анализа следует, что исследуемые воды по степени минерализации классифицируются как пресные и слабосолоноватые. По уровню pH 40% вод являются нейтральными и 60% – слабощелочными. По степени жесткости 40%

вод являются мягкими, 30% – средней жесткости, и 30% – жесткими.

По анионному составу поверхностные воды зимнего и весенних периодов особых различий не имеют. Исследуемые воды гидрокарбонатно-сульфатные, исключением являются воды оз. Даманское, где содержание хлоридов превышает установленные нормативы (350 мг/дм^3). По катионному составу воды всех исследуемых объектов являются натриево-магниевыми (рисунок 2).

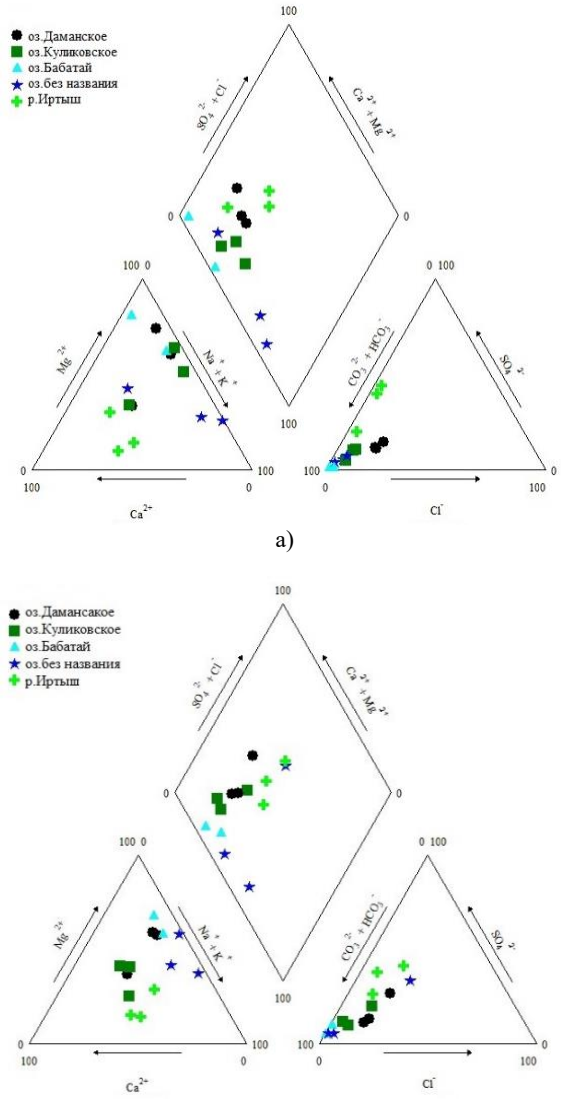


Рисунок 2. Результаты химического анализа поверхностных вод: в зимнее время (а) и в весеннее время (б)

Результаты химического анализа подземных вод как по анионному, так и по катионному составам аналогично поверхностным водам особых различий не имеют. По анионному составу исследуемые воды являются гидрокарбонатными, по катионному составу являются магниево-натриевыми-кальциевыми (рисунок 3).

Проведен масс-спектрометрический анализ воды, по определению основных 22 микроэлементов (Li, Na, Mg, Al, K, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Ni и др.), которые относятся ко II–III классу опасности по своей биологической роли (таблицы 1, 2).

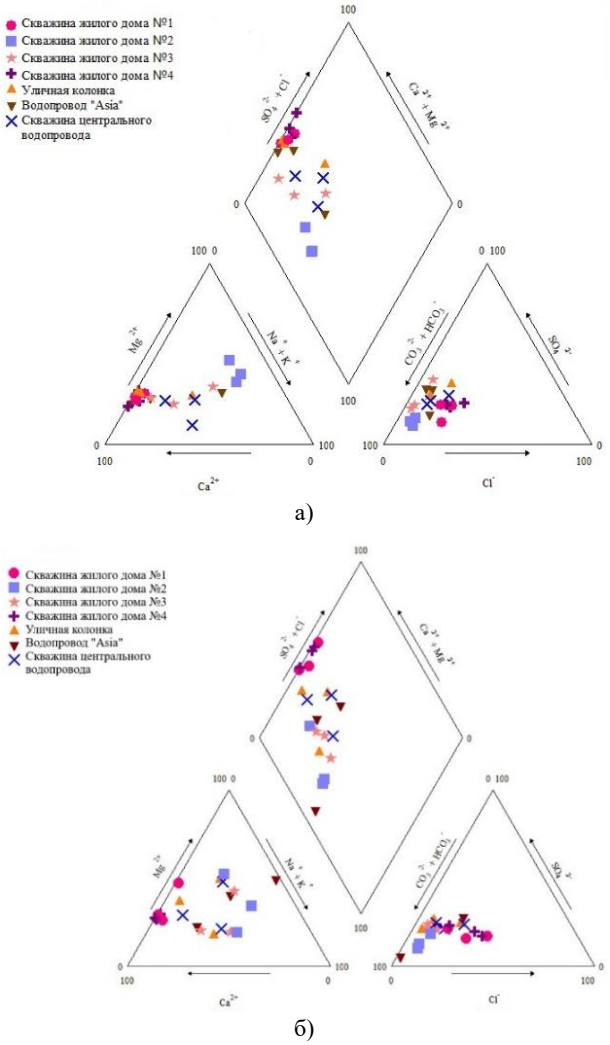


Рисунок 3. Результаты химического анализа подземных вод: в зимнее время (а) и в весеннее время (б)

Согласно анализу полученных результатов, обнаружено превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) химических элементов, относящихся ко II–III классу опасности: Li – 5,3 ПДК, Ba – 4 ПДК, Ag – 2,5 ПДК, V – 2,4 ПДК, Mn – 1,1 ПДК. Концентрация Th в исследуемых образцах воды незначительна и характеризуется небольшими пределами колебаний. Содержание U в исследуемых образцах изменчиво и наблюдается превышение его концентрации (1,16 ПДК) [22].

Таблица 1. Элементный состав поверхностных и подземных вод по II классу опасности, мкг/л

Точка отбора	Li	Na	Al	As	Rb	Sr	Ag	Ba	Pb	Bi
оз. Даманское	110–190 (n=4)	11000–910000 (n=5)	23–2910 (n=4)	15–36 (n=4)	3,7–36 (n=5)	175–2400 (n=5)	110 (n=1)	40–150 (n=5)	0,5–1,3 (n=2)	<п.о.
оз. Куликовское	20–270 (n=4)	16500–660000 (n=5)	36–430 (n=3)	12–27 (n=2)	2,4–46 (n=5)	240–2000 (n=4)	0,37 (n=1)	31–150 (n=5)	2,7–8,0 (n=2)	430 (n=1)
оз. Бабатай	53–80 (n=3)	48000–260000 (n=3)	41–68 (n=2)	5,1–5,7 (n=2)	4,5–6,3 (n=3)	1500–4400 (n=3)	1,5 (n=1)	47–110 (n=3)	2,1–2,5 (n=2)	5,2 (n=1)
оз. без названия	9–190 (n=4)	12900–200000 (n=4)	78–540 (n=3)	1,5–28 (n=3)	1,3–14 (n=4)	96–430 (n=5)	<п.о.	8,3–42 (n=4)	0,5–2,4 (n=4)	<п.о.
р. Иртыш	<п.о.	1900–18100 (n=5)	96–360 (n=3)	<п.о.	1,1–1,2 (n=2)	120–260 (n=5)	1,2 (n=1)	9–24 (n=5)	0,88 (n=1)	1,1 (n=1)
скважина жилого дома №1	3,1–6,1 (n=3)	34000–48000 (n=5)	17–24 (n=2)	1,4–1,9 (n=2)	0,4 (n=1)	720–970 (n=5)	8,4 (n=1)	140–195 (n=5)	0,54–1,0 (n=2)	2,8 (n=1)
скважина жилого дома №2	32–160 (n=5)	45000–199000 (n=5)	26–51 (n=2)	<п.о.	2,2–3,7 (n=4)	430–1200 (n=5)	<п.о.	130–420 (n=5)	0,65 (n=1)	<п.о.
скважина жилого дома №3	<п.о.	2800–12800 (n=4)	43–430 (n=3)	<п.о.	0,4 (n=1)	160–330 (n=4)	<п.о.	29–58 (n=4)	0,76 (n=1)	<п.о.
скважина жилого дома №4	7–14 (n=2)	13000–55000 (n=4)	19–85 (n=3)	<п.о.	0,53 (n=1)	560–1200 (n=4)	0,2 (n=1)	55–130 (n=4)	1,1 (n=1)	<п.о.
уличная колонка	2,7 (n=1)	4900–11000 (n=5)	29–32 (n=2)	1,6 (n=1)	0,6–1,0 (n=2)	140–560 (n=5)	0,8–75 (n=2)	16–68 (n=5)	1,0 (n=1)	<п.о.
водопровод «Asia»	1,2–160 (n=4)	3800–199000 (n=5)	44–51 (n=2)	2,2 (n=2)	2,3–3,7 (n=2)	350–1200 (n=5)	1,0 (n=1)	39–380 (n=5)	0,47–2,0 n=3)	<п.о.
скважина центрального водопровода	2,8 (n=1)	5900–25000 (n=4)	26–41 (n=3)	1,9 (n=1)	0,3 (n=1)	290–560 (n=4)	<п.о.	35–64 (n=4)	5,6 (n=1)	1,7 (n=1)
ПДК	**30**	**200000**	**500**	**50**	**100**	**7000**	**30**	**100**	**30**	**100**

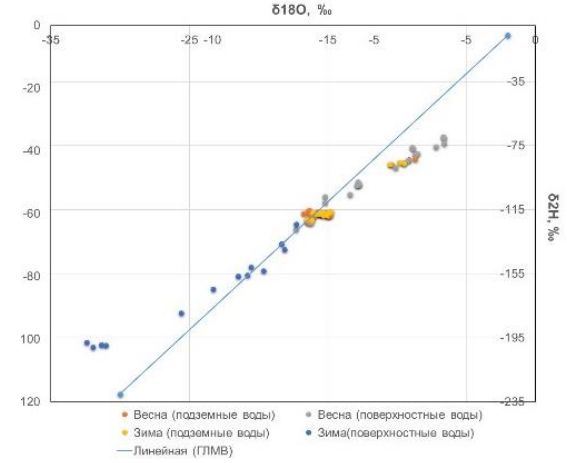
Примечание: ** n – количество проведенных анализов*

Таблица 2. Элементный состав поверхностных и подземных вод по III классу опасности, мкг/л

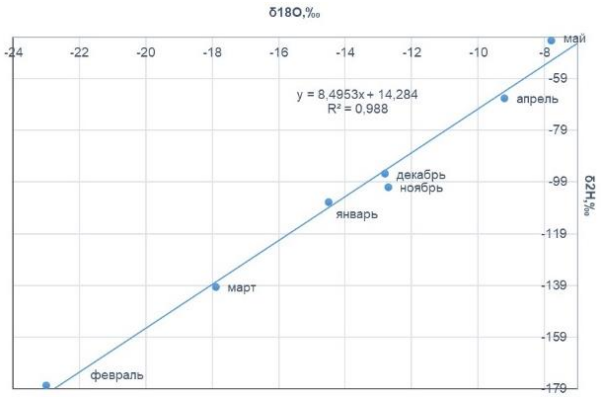
Точка отбора	Zn	Cr	V	Ni	Cu	Mn	Fe
оз. Даманское	15–150 (n=5)*	<п.о.	<п.о.	12–18 (n=2)	5,5 (n=1)	16–400 (n=5)	210–1800 (n=2)
оз. Куликовское	8–110 (n=5)	6–6,4 (n=2)	<п.о.	14 (n=1)	12 (n=1)	19–330 (n=5)	140–280 (n=4)
оз. Бабатай	19–95 (n=3)	4,8–6 (n=2)	<п.о. о.	15 (n=1)	6,3 (n=1)	56–210 (n=2)	150–170 (n=2)
оз. Без названия	24–38 (n=4)	13 (n=1)	19–20 (n=2)	20–21 (n=2)	7,7 (n=1)	10–320 (n=4)	300–350 (n=3)
р. Иртыш	20–88 (n=5)	<п.о.	<п.о.	21 (n=1)	<п.о.	260–330 (n=2)	210–410 (n=3)
скважина жилого дома №1	17–67 (n=5)	<п.о.	82 (n=1)	11–22 (n=2)	<п.о.	270–340 (n=2)	<п.о.
скважина жилого дома №2	14–57 (n=5)	<п.о.	240 (n=1)	19–21 (n=2)	5,6–6,0 (n=2)	46–550 (n=5)	145 (n=1)
скважина жилого дома №3	23–37 (n=3)	<п.о.	47 (n=1)	22 (n=1)	<п.о.	310–340 (n=2)	<п.о.
скважина жилого дома №4	19–140 (n=4)	<п.о.	99 (n=1)	11–22 (n=3)	<п.о.	110–470 (n=4)	<п.о.
уличная колонка	22–96 (n=4)	<п.о.	<п.о.	11–17 (n=2)	<п.о.	240–260 (n=2)	92–100 (n=2)
водопровод «Asia»	18–90 (n=5)	<п.о.	240 (n=1)	19 (n=1)	<п.о.	14–550 (n=4)	145–180 (n=2)
скважина центрального водопровода	23–140 (n=4)	<п.о.	<п.о.	9,1–20 (n=2)	12 (n=1)	210–340 (n=2)	<п.о.
ПДК	**5000**	**50**	**100**	**100**	**1000**	**500**	**1000**

Примечание: ** n – количество проведенных анализов*

В результате проведения лабораторных испытаний получены значения распределения стабильных изотопов в поверхностных и подземных водах на исследуемой территории (в зимний и весенний периоды). Согласно полученным данным изотопный состав поверхностных вод изменяется в диапазоне по ^{18}O от −6,59‰ до −16,2‰, а по ^{2}H от −63,3‰ до −127,2‰, подземных по ^{18}O от −8,7‰ до −16,5‰, а по ^{2}H от −83,5‰ до −122,99‰ (рисунок 3, а).



а)



б)

Рисунок 4. Результаты изотопного анализа: поверхностных и подземных вод (а) и атмосферных осадков (б)

Из полученных данных следует, что подземные воды подвержены сезонному изменению, утяжеляются в зимнее время и облегчаются в весеннй период. Изотопный состав подземных вод стабилен и не изменяется, за исключением изотопного состава в точке 2 возле придомового участка, изотопный состав которого в зимнее время имеет облегченный состав.

На основании результатов событийного отбора проб атмосферных осадков исследуемого региона построена первичная локальная линия метеорных вод (рисунок 4, б), из которой следует, что изотопный состав атмосферных осадков в рамках временного периода изменяется в диапазоне по ^{18}O от −7,8‰ до −17,9‰, а по ^{2}H от −44,3‰ до −177,8‰.

Выводы

В результате проведенного исследования получены данные, которые показывают, что химические показатели, макро-, микро-компонентного и изотопного состава воды села Бескарагай области Абай в период зимнего и весеннего сезона изменяются в широком интервале значений. Получены первичные данные изотопного состава атмосферных осадков для построения локальной линии метеорных вод и определены изотопные составы поверхностных и подземных вод исследуемой территории. По макро-компонентному составу имеется превышение содержания элементов, относящихся ко II и III классу опасности.

Полученные данные будут являться основой для проведения дальнейших исследований, направленных на изучение качественного и количественного состава водных ресурсов.

Данные исследования выполнены в рамках программно-целевого финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан BR21881915 «Применение ядерных, сейсмических и инфразвуковых методов для оценки климатических изменений и смягчения последствий изменения климата».

Литература

1. Водные ресурсы Казахстана: оценка, прогноз, управление: В 21-м томе: монография. Том VI. Снежно-ледовые ресурсы Казахстана / И.В. Северский, А.Л. Кокарев, Н.В. Пиманкина. – Алматы. – 2012. – 246 с.
2. Веселов, В.В. Гидрогеологическое районирование и региональная оценка ресурсов подземных вод Казахстана: (анализ результатов исследований за 1961–2002 г.). – Алматы: НИЦ «Ғылым». – 2002. – 438 с.
3. Смоляр, В.А. Комплексное и рациональное использование поверхностных и подземных вод – основа водной безопасности Республики Казахстан / В.А. Смоляр, Д.С. Сапаргалиев, Д.В. Ким // Геология и охрана недр. – 2020. – № 1 (74). – С 59–71.
4. Акпамбетова, К.М. Водно-ресурсный потенциал аридной зоны Казахстана / К.М. Акпамбетова // ЭКСПО-2017: ТЕХНОЛОГИИ БУДУЩЕГО : материалы респ. науч.- практ. конф. – Караганда: Издательство КарГУ. – 2016. – С. 221–225.
5. Батралина, Н.Ж. Состояние водных ресурсов Восточно-Казахстанской области / Батралина Н.Ж. // Гигиена труда и медицинская экология. – 2016. – № 4 (53). – С. 34–40.
6. Государственный водный кадастр. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество: (ежегод. изд.). – Алматы. – 2018. – С. 90–137.
7. Гидрогеология СССР. Т.37: Восточный Казахстан / отв. ред. Б.Е. Антыпко, А.П., Кузнецов, С.В. Левин. – М.: Недра. – 1971. – Т.37. – 308 с.
8. Ферронский, В.И. Изотопы гидросферы Земли / В.И. Ферронский, В.А. Поляков ; Российская акад. наук, Ин-т водных проблем – М.: Научный мир. – 2009. – 632 с.
9. Weston, Jr. R.E. Hydrogen isotope fractionation between ice and water // Geochimica et Cosmochimica acta. –

1955. –Vol. 8, Iss. 5 – P. 281–284. – https://doi.org/10.1016/0016-7037(55)90002-8
10. Фор, Г. Основы изотопной геологии / / Г. Фор; пер. с англ. И. М. Горохова, Ю. А. Шуколюкова. – М.: Мир. – 1989. – 589 с.
11. Васильчук, Ю.К. Основы изотопной геокриологии и гляциологии : учебник / Ю.К. Васильчук, В.М. Котляков – М.: Изд-во Моск. ун-та. – 2000. – 616 с.
12. Bowen, G. J. Interpolating the isotopic composition of modern meteoric precipitation / G. J. Bowen, J. Revenaugh // Water Resour. Res. – 2003. – Vol. 39. – 13 p. https://doi.org/10.1029/2003WR002086
13. Hughes C. E. Spatial and temporal variation in precipitation isotopes in the Sydney Basin, Australia / Hughes, C. E., Crawford J. // J. Hydrol. – 2013. – Vol. 489. – P. 42–55. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.02.036
14. IAEA, Global network of isotopes in precipitation // Vienna Global Network of Isotopes in Precipitation. – Viena: IAEA. – 2014.
15. РИ «Методические рекомендации по отбору проб твердых и жидких атмосферных выпадений», РГП на ПХВ НЯЦ РК филиал ИРБЭ, г. Курчатов. – 7 с.
16. ГОСТ Р 57164-2016. Вода питьевая. Методы определения запаха, вкуса и мутности. – Москва – 2019. – 24 с.
17. ГОСТ 26449.0-85. Установки дистилляционные опреснительные стационарные. Общие требования к методам химического анализа при опреснении соленых вод. – Москва. – 1987 г. – 56 с.
18. ГОСТ ISO 17294-2-2019 Межгосударственный стандарт. Качество воды. Применение масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Ч. 2 : Определение некоторых элементов, включая изотопы урана. – Минск: Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – 2019. – 27 с.
19. Изотопный анализатор Модель LGR 912-0008: Руководство пользователя. Документ № 912-U008 Переработанное и исправленное издание 01. Дата выпуска 9/12/2014.
20. Приказ Министра здравоохранения Республики Казахстан от 24 ноября 2022 года № ҚР ДСМ-138 «Об утверждении Гигиенических нормативов показателей безопасности хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования» (зарегистрирован в Министерстве юстиции Республики Казахстан 25 ноября 2022 года № 30713).
21. Приказ Министра здравоохранения Республики Казахстан от 20 февраля 2023 года № 26 «Об утверждении Санитарных правил «Санитарно-эпидемиологические требования к водоисточникам, местам водозабора для хозяйственно-питьевых целей, хозяйственно-питьевому водоснабжению и местам культурно-бытового водопользования и безопасности водных объектов» (зарегистрирован в Министерстве юстиции Республики Казахстан 20 февраля 2023 года № 31934).
22. Guidelines for drinking water quality: Recommendations / incorporating first addendum, Third Edition. – World Health Organization. – Switzerland. – 2011. – Vol. 1. – 541 p.

REFERENCES

1. Vodnye resursy Kazakhstana: otsenka, prognoz, upravlenie: V 21-m tome: monografiya. Tom VI. Snezhnoledovye resursy Kazakhstana / I.V. Severskiy, A.L. Kokarev, N.V. Pimankina. – Almaty. – 2012. – 246 p.
2. Veselov, V.V. Gidrogeologicheskoe rayonirovanie i regional'naya otsenka resursov podzemnykh vod Kazakhstana: (analiz rezul'tatov issledovaniy za 1961–2002 g.). – Almaty: NITs «Gylym». – 2002. – 438 p.
3. Smolyar, V.A. Kompleksnoe i ratsional'noe ispol'zovanie poverkhnostnykh i podzemnykh vod – osnova vodnoy bezopasnosti Respubliki Kazakhstan / V.A. Smolyar, D.S. Sapargaliev, D.V. Kim // Geologiya i okhrana nedr. – 2020. – No. 1 (74). – P. 59–71.
4. Akpambetova, K.M. Vodno-resursnyy potentsial aridnoy zony Kazakhstana / K.M. Akpambetova // EKSPO-2017: TEKhNOLOGII BUDUShchEGO : materialy resp. nauch. - prakt. konf. – Karaganda: Izdatel'stvo KarGU. – 2016. – P. 221–225.
5. Batralina, N.Zh. Sostoyanie vodnykh resursov Vostochno-Kazakhstanskoy oblasti / Batralina N.Zh. // Gigiena truda i meditsinskaya ekologiya. – 2016. – No. 4 (53). – P. 34–40.
6. Gosudarstvennyy vodnyy kadastr. Resursy poverkhnostnykh i podzemnykh vod, ikh ispol'zovanie i kachestvo: (ezhegod. izd.). – Almaty. – 2018. – P. 90–137.
7. Gidrogeologiya SSSR. T.37: Vostochnyy Kazakhstan / otv. red. B.E. Antypko, A.P., Kuznetsov, S.V. Levin. – Moscow: Nedra. – 1971. – Vol. 37. – 308 p.
8. Ferronskiy, V.I. Izotopy gidrosfery Zemli / V.I. Ferronskiy, V.A. Polyakov ; Rossiyskaya akad. nauk, In-t vodnykh problem – Moscow: Nauchnyy mir. – 2009. – 632 p.
9. Weston, Jr. R.E. Hydrogen isotope fractionation between ice and water // Geochimica et Cosmochimica acta. – 1955. –Vol. 8, Iss. 5 – P. 281–284. – https://doi.org/10.1016/0016-7037(55)90002-8
10. For, G. Osnovy izotopnoy geologii / / G. For; per. s angl. I. M. Gorokhova, Yu. A. Shukolyukova. – Moscow: Mir. – 1989. – 589 p.
11. Vasil'chuk, Yu.K. Osnovy izotopnoy geokriologii i glyatsiologii : uchebnik / Yu.K. Vasil'chuk, V.M. Kotlyakov – Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta. – 2000. – 616 p.
12. Bowen, G. J. Interpolating the isotopic composition of modern meteoric precipitation / G. J. Bowen, J. Revenaugh // Water Resour. Res. – 2003. – Vol. 39. – 13 p. https://doi.org/10.1029/2003WR002086
13. Hughes C. E. Spatial and temporal variation in precipitation isotopes in the Sydney Basin, Australia / Hughes, C. E., Crawford J. // J. Hydrol. – 2013. – Vol. 489. – P. 42–55. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.02.036
14. IAEA, Global network of isotopes in precipitation // Vienna Global Network of Isotopes in Precipitation. – Viena: IAEA. – 2014.
15. RI «Metodicheskie rekomendatsii po otboru prob tverdykh i zhidkikh atmosfernykh vypadeniy», RGP na PKhV NYaTs RK filial IRBE, g. Kurchatov. – 7 p.
16. GOST R 57164-2016. Voda pit'evaya. Metody opredeleniya zapakha, vkusa i mutnosti. – Moscow. – 2019. – 24 p.
17. GOST 26449.0-85. Ustanovki distillyatsionnye opresnitel'nye statsionarnye. Obshchie trebovaniya k metodam khimicheskogo analiza pri opresnenii solenykh vod. – Moscow. – 1987. – 56 p.
18. GOST ISO 17294-2-2019 Mezhgosudarstvennyy standart. Kachestvo vody. Primenenie mass-spektrometrii s induktivno-svyazannoy plazmoy. Ch. 2 : Opredelenie nekotorykh elementov, vklyuchaya izotopy urana. – Minsk: Evraziyskiy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii. – 2019. – 27 p.

19. Izotopnyy analizator Model' LGR 912-0008: Rukovodstvo pol'zovatelya. Dokument No. 912-U008 Pererabotannoe i ispravlennoe izdanie 01. Data vypuska 9/12/2014.
20. Prikaz Ministra zdravookhraneniya Respubliki Kazakhstan ot 24 noyabrya 2022 goda No. ҚR DSM-138 «Ob utverzhdenii Gigienicheskikh normativov pokazateley bezopasnosti khozyaystvenno-pit'evogo i kul'turno-bytovogo vodopol'zovaniya» (zaregistrirovan v Ministerstve yustitsii Respubliki Kazakhstan 25 noyabrya 2022 goda No. 30713).
21. Prikaz Ministra zdravookhraneniya Respubliki Kazakhstan ot 20 fevralya 2023 goda No. 26 «Ob utverzhdenii Sanitarnykh pravil «Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k vodoistochnikam, mestam vodozabora dlya khozyaystvenno-pit'evykh tseley, khozyaystvenno-pit'evomu vodosnabzheniyu i mestam kul'turno-bytovogo vodopol'zovaniya i bezopasnosti vodnykh ob"ektov» (zaregistrirovan v Ministerstve yustitsii Respubliki Kazakhstan 20 fevralya 2023 goda No. 31934).
22. Guidelines for drinking water quality: Recommendations / incorporating first addendum, Third Edition. – World Health Organization. – Switzerland. – 2011. – Vol. 1. – 541 p.

АТМОСФЕРАЛЫҚ ЖАУЫН-ШАШЫННЫҢ ОЛАРДЫҢ САПАЛЫҚ ЖӘНЕ МӨЛШЕРЛІК ҚҰРАМЫНА ӘСЕРІН БАҒАЛАУ ҮШІН СУ РЕСУРСТАРЫН БАРЛАП ЗЕРТТЕУ (Бесқарағай ауылы, Абай Облысы)

А. М. Надеева, А. С. Мамырбаева*, А. К. Айдарханова, Н. В. Ларионова, А. О. Айдарханов, Б. Е. Мәден

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

** Байланыс үшін E-mail: mamyrbaevaa@nnc.kz*

Жұмыста Абай облысы Бесқарағай ауылының су ресурстарын зерттеу нәтижелері ұсынылған. Жүргізілген жұмыстардың нәтижесінде сулардың макро-, микро-құрауыштары және изотоптық құрамдарының, жалпы химиялық көрсеткіштерінің нәтижелері алынды. Судың изотоптық құрамы (^{2}H және ^{18}O) кең ауқымда өзгеретіні және жерасты суларының тұрақты «жеңіл» изотоптық құрамымен сипатталатыны анықталды. Зерттелетін су үлгілері минералдану дәрежесі бойынша тұщы және сәл тұзды болып жіктеледі. Қышқылдық деңгейі бойынша-бейтарап және сәл сілтілі. Кермектік дәрежесі бойынша-жұмсақ, орташа кермекті және кермек су. Иондық құрамы бойынша гидрокарбонатты – сульфатты – хлоридті және натрийлі – магнийлі – кальцийлі топтың сулары басым.

Түйін сөздер: *тұрақты изотоптар (^{2}H және ^{18}O), изотоптық гидрология, атмосфералық жауын-шашын, жерасты суы, жерүсті суы.*

RECONNAISSANCE SURVEY OF WATER RESOURCES TO ASSESS THE IMPACT BY PRECIPITATION ON THEIR QUALITATIVE AND QUANTITATIVE COMPOSITION (Beskaragai vil., Abai region)

A. M. Nadeyeva, A. S. Mamyrbayeva*, A. K. Aidarkhanova, N. V. Larionova, A. O. Aidarkhanov, B. Ye. Maden

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

** E-mail for contacts: mamyrbaevaa@nnc.kz*

The paper presents findings of water resources of Beskaragai village, Abai region. Macro-, micro-component and isotopic compositions of waters, general chemical parameters were obtained. It has been established that the isotopic composition of waters (^{2}H and ^{18}O) varies widely and is characterized by a constant "light" isotopic composition of groundwater. The studied water samples are classified as fresh and slightly subsaline according to the degree of mineralization. By the acidity level – neutral and slightly alkaline. According to the degree of hardness – soft, medium hard and hard. The ion composition of waters of the hydrocarbonate – sulfate – chloride and sodium – magnesium – calcium group is dominant.

Keywords: *stable isotopes (^{2}H and ^{18}O), isotope hydrology, atmospheric precipitation, ground water, surface water.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-160

Исправление к статье «РАСЧЕТЫ AB-INITIO РОМБОЭДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ $BaTiO_3$ (111), КОМБИНИРОВАННОЙ С ГРАФЕНОВЫМИ ПЛЕНКАМИ»

Б. М. Сатанова, Г. А. Каптагай, А. П. Жаркымбекова, Ф. У. Абуова, А. У. Абуова, Р. Н. Асылбаев, Н. О. Койлык, К. Т. Тугелбаева

Вестник НЯЦ РК. 2023; 4(96):91–97

На стр. 96 в разделе «Заключение» вместо:
«These studies were funded by the Ministry of Science and higher education of the Republic of Kazakhstan as part of the grant funding “Development and Research of New Multifunctional vdW Structures of 2D Films Based on Transition Metal Oxides” (IRN-AR14972694).»

следует читать:
«These studies were funded by the Ministry of Science and higher education of the Republic of Kazakhstan as part of the grant funding “Development and research of new multifunctional vdW Structures of 2D films based on Transition Metal Oxides” (IRN-AP14972859).»

Оригинальная статья может быть найдена по ссылке https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-4-91-97.

Мақаланы түзету «ГРАФЕН ПЛЕНКАЛАРЫМЕН КОМБИНАЦИЯЛАНҒАН РОМБОЭДРЛІК $BaTiO_3$ (111) БЕТІНІҢ AB- INITIO ЕСЕПТЕУЛЕРІ»

Б. М. Сатанова, Г. Ә. Қаптағай, А. П. Жарқымбекова, Ф. У. Абуова, А. У. Абуова, Р. Н. Асылбаев, Н. О. Қойлық, К. Т. Тугелбаева

ҚР ҰЯО жаршысы. 2023; 4(96):91–97

96-бетте «Қорытынды» бөліміндегі:
«These studies were funded by the Ministry of Science and higher education of the Republic of Kazakhstan as part of the grant funding “Development and Research of New Multifunctional vdW Structures of 2D Films Based on Transition Metal Oxides” (IRN-AR14972694).»

«These studies were funded by the Ministry of Science and higher education of the Republic of Kazakhstan as part of the grant funding “Development and research of new multifunctional vdW structures of 2D films based on Transition Metal Oxides” (IRN-AP14972859).» деп оқу қажет.

Түпнұсқа мақаланы https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-4-91-97 сілтемесі арқылы табуға болады.

Erratum to: «AB-INITIO CALCULATIONS OF RHOMBOHEDRAL $BaTiO_3$ (111) SURFACE COMBINED WITH GRAPHENE FILMS»

B. M. Satanova, G. A. Kaptagay, A. P. Zharkymbekova, F. U. Abuova, A. U. Abuova, R. N. Assylbayev, N. O. Koylyk, K. T. Tugelbayeva

NNC RK Bulletin. 2023; 4(96):91–97

Page 96, in the section “Conclusion” instead of:
«These studies were funded by the Ministry of Science and higher education of the Republic of Kazakhstan as part of the grant funding “Development and Research of New Multifunctional vdW Structures of 2D Films Based on Transition Metal Oxides” (IRN-AR14972694).»

should read:
«These studies were funded by the Ministry of Science and higher education of the Republic of Kazakhstan as part of the grant funding “Development and research of new multifunctional vdW structures of 2D films based on Transition Metal Oxides” (IRN-AP14972859).»

The original article can be found at https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-4-91-97.

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-161

Исправление к статье «ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ: МЕТОДЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ 2D МАТЕРИАЛОВ»

Г. А. Каптагай, Б. М. Сатанова, Ф. У. Абуова, Н. О. Койлык, А. У. Абуова, С. А. Нуркенов, А. П. Жаркымбекова

Вестник НЯЦ РК. 2022; 4(92):35–40

На стр. 39 в разделе «Перспективы» вместо:
«These studies were funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan in the framework of grant funding “Development and research of new multifunctional vdW structures of 2D films based on transition metal oxides” (IRN-AR14972694).»

следует читать:
«These studies were funded by the Ministry of Science and higher education of the Republic of Kazakhstan as part of the grant funding “Development and research of new multifunctional vdW structures of 2D films based on Transition Metal Oxides” (IRN-AP14972859).»

Оригинальная статья может быть найдена по ссылке https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-4-35-40.

Мақаланы түзету «ТӨМЕН ӨЛШЕМДІ ЖҮЙЕЛЕРДІҢ ОПТИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ: 2D МАТЕРИАЛДАРДЫ ТЕОРИЯЛЫҚ ЗЕРТТЕУ ӘДІСТЕРІ»

Г. А. Қаптағай, Б. М. Сатанова, Ф. У. Абуова, Н. О. Қойлық, А. У. Абуова, С. А. Нуркенов, А. П. Жарқымбекова

ҚР ҰЯО жаршысы. 2022; 4(92):35–40

39-бетте «Перспективалар» бөліміндегі:
«These studies were funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan in the framework of grant funding “Development and research of new multifunctional vdW structures of 2D films based on transition metal oxides” (IRN-AR14972694).»

«These studies were funded by the Ministry of Science and higher education of the Republic of Kazakhstan as part of the grant funding “Development and research of new multifunctional vdW structures of 2D films based on Transition Metal Oxides” (IRN-AP14972859).» деп оқу қажет.

Түпнұсқа мақаланы https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-4-35-40 сілтемесі арқылы табуға болады.

Erratum to: «OPTICAL PROPERTIES OF LOW-DIMENSIONAL SYSTEMS: METHODS OF THEORETICAL STUDY OF 2D MATERIALS»

G. A. Kaptagay, B. M. Satanova, F. U. Abuova, N. O. Koilyk, A. U. Abuova, S. A. Nurkenov, A. P. Zharkymbekova

NNC RK Bulletin. 2022; 4(92):35–40

Page 39, in the section “Perspectives” instead of:
«These studies were funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan in the framework of grant funding “Development and research of new multifunctional vdW structures of 2D films based on transition metal oxides” (IRN-AR14972694).»

should read:
«These studies were funded by the Ministry of Science and higher education of the Republic of Kazakhstan as part of the grant funding “Development and research of new multifunctional vdW structures of 2D films based on Transition Metal Oxides” (IRN-AP14972859).»

The original article can be found at https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-4-35-40.

СПИСОК АВТОРОВ

Абдыбай У. Б., 83
Абуова А. У., 160, 161
Абуова Ф. У., 160, 161
Агатанова А. А., 115, 123
Айдарханов А. О., 144, 153
Айдарханова А. К., 153
Акатан К., 29
Алимов Д., 5
Аманжулов Б. С., 105
Амренова А. У., 83
Артемов С. В., 5
Асылбаев Р. Н., 160
Бачурина И. А., 12
Баяхметов О., 49
Бедельбекова К. А., 44
Бейсебеков М. М., 29
Буртебаев Н. Т., 5
Витюк В. А., 56
Витюк Г. А., 56
Гулькин А. В., 21
Должиков С. А., 56
Жанболатова Г. К., 115
Жаркымбекова А. П., 160, 161
Женис К., 129
Жукешов А. М., 83
Жуманазар Н., 137
Зазулин Д. М., 5
Зарва Д. Б., 21
Здоровец М. В., 137
Злоцкий С. В., 105
Ибраева Ж. Е., 29
Иванов И. А., 105
Игибаев У. А., 65
Имашева А. А., 29
Исаев Д. А., 5
Кабдрахманова С. К., 29
Кадырова Н. Ж., 144
Казаков Е. Н., 65
Кайырбекова А. Ж., 115
Какимжанов Д. Н., 91
Кантай Н., 29
Каптагай Г. А., 160, 161
Келсингазина Р. Е., 56
Кемелжанова С. Е., 5
Койлык Н. О., 160, 161
Колобердин М. В., 105
Корольков И. В., 137
Курахмедов А. Е., 105
Кусаинов А. Т., 129
Ларионова Н. В., 12, 153
Ленник С. Г., 44
Маден Б. Е., 153
Мамырбаева А. С., 153
Маусымбаева А. М., 29
Мережко Д. А., 35
Мережко М. С., 35
Микаилова Р. А., 74
Миниязов А. Ж., 115, 123
Михайлова Н. Н., 65
Молдабеков Ж. М., 83
Морозов В. Г., 65
Мукамбаев А. С., 65
Муканов Е. Б., 5
Мукенева С. А., 21
Муктанова Н., 91
Мукушева М. К., 74
Мухамедов Н. Е., 56
Мухамедова Н. М., 115
Мухаметулы Б., 49
Надеева А. М., 153
Насурлла Маржан, 5
Насурлла Маулен, 5
Нуркенов С. А., 161
Нурпеисова Д. Т., 137
Ольховик Д. А., 129
Паницкий А. В., 144
Полковников В. С., 129
Рахадилов Б. К., 91
Рыскулов А. Е., 105
Сабидолда А., 5
Сайранбаев Д. С., 49
Сапар А. Д., 105
Сатанова Б. М., 160, 161
Сахиев С. К., 5, 49
Сидоров Я. В., 5
Скаков М. К., 123
Соколенко Е. К., 44
Соколов И. А., 115, 123
Спиридонов С. И., 74
Такиева А. М., 35
Темир А. М., 105
Темирханова Г., 29
Топорова А. В., 12
Тугелбаева К. Т., 160
Туленбергенов Т. Р., 115, 123
Турлыбекулы К., 49
Турсумбеков А. Ш., 5
Углов В. В., 105
Унгарбаев Е. О., 105
Ходжаев Р., 5
Чектыбаев Б. Ж., 129
Шаймерденов А. А., 49
Шакаева А. Х., 137
Шапиро Д., 49

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи для публикации в журнале отправляются авторами после регистрации на веб-сайте журнала в электронном виде в формате MS WORD (.docx), а после принятия решения о публикации статьи редакцией (по окончании процесса проверки и рецензирования) – и в виде печатной копии окончательной редакции статьи с согласием авторов на публикацию и их подписями (по почте, курьером и пр. в адрес редакции).

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 (600–2400 dpi). Горизонтальное расположение листов не допускается.

Используйте шрифт Times New Roman высотой 10 пунктов. Пожалуйста, используйте встроенные стили заголовков (Заголовок 1, 2…) только для названия статьи и заголовков подразделов, и не используйте их для обычного текста, таблиц и подрисуночных подписей.

В левом верхнем углу первой страницы должен быть указан индекс УДК. Название статьи печатается ниже заглавными буквами, в одном абзаце. После этого печатается текст краткой аннотации на языке статьи (100–3000 символов), и отдельной строкой (после фразы Ключевые слова:) – ключевые слова (5–10). Далее, со следующего абзаца – основной текст, содержащий разделы: Введение, Основную часть и Результаты (возможно, с подразделами), Заключение. После текста статьи приводится список литературы (на языках оригиналов) и блоки «название статьи, аннотация, ключевые слова) на двух оставшихся языках.

Обратите внимание, что ФИО авторов и представляемые организации в статье указывать не нужно, т.к. статьи проходят двойное «слепое» рецензирование. Эту информацию необходимо будет заполнить на трех языках (русском, казахском, английском) в форме на веб-сайте при подаче статьи. Рекомендуем заранее подготовить ее в виде отдельного документа с таблицами по образцу (см. ОБРАЗЕЦ на следующей странице) и приложить к статье.

Для текста статьи используйте одинарный межстрочный интервал, между абзацами не нужно вставлять пустые абзацы и строки.

Не используйте таблицы для расположения иллюстраций и подрисуночных подписей, а также средства рисования MS Word поверх иллюстраций.

Максимально допустимый объем статьи – 10 страниц.

При написании статей необходимо придерживаться следующих требований:

- Окончательная редакция статьи, прошедшая рецензирование и допущенная к публикации, должна содержать блоки на трех языках – казахском, английском и русском, с указанием названия статьи, фамилий, имен, отчеств авторов, полного названия организаций, городов и стран местонахождения, которые они представляют, аннотации (объемом 100–3000 символов, включая знаки препинания и пробелы), и ключевых слов (5–10).
- Ссылки на литературные источники даются в тексте статьи цифрами в квадратных […] скобках по мере упоминания. Список литературы приводится по ГОСТ 7.1-2003.
- Пожалуйста, не используйте механизм автоматической нумерации (поля) MS Word для нумерации ссылок на литературу, списков, рисунков и таблиц – используйте обычный текст;
- Иллюстрации (графики, схемы, диаграммы) должны быть выполнены на компьютере (ширина рисунка 8 или 14 см). Особое внимание обратите на надписи на рисунке – они должны быть различимы при уменьшении до указанных выше размеров. Файлы рисунков должны быть представлены отдельно в одном из растровых – .tif, .png (для схем и рисунков с надписями), .jpg (для фото) с разрешением 300 dpi (~1000 px для рисунков шириной 8 см и ~1800 px для рисунков шириной 14 см) или векторных – .svg, .wmf, .emf форматах. Названия файлов должны соответствовать положению в статье (напр. Рисунок 1-a.tiff). Для надписей на рисунках предпочтительно использовать шрифт Arial Narrow или аналогичный (узкий шрифт без засечек).
- Математические формулы в тексте должны быть набраны как уравнения MS Word или формулы MathType. Следует нумеровать лишь те формулы, на которые имеются ссылки в тексте.
- Текст должен быть тщательным образом выверен и отредактирован. Бумажная версии статья должна быть в конце подписана авторами.

К статье прилагаются следующие документы:

1) *Сопроводительное письмо от авторов*, в котором должны содержаться сведения о том, что статья может быть опубликована в открытой печати, ранее не была опубликована, не находится на рассмотрении на предмет публикации в других изданиях, статья не содержит информации, способной привести к конфликту интересов.
2) *Файлы рисунков.*

Название статьи, аннотация, ключевые слова, а также сведения обо всех авторах статьи заполняются на 3-х языках (русском, казахском, английском) в форме на сайте при подаче статьи (эту информацию также желательно приложить к статье в виде отдельного файла – см. ОБРАЗЕЦ на следующей странице).

Дополнительную актуальную информацию по оформлению, подготовке статей, авторским правам, регистрации можно получить на веб-сайте журнала в разделе **Правила для авторов** (https://journals.nnc.kz/jour/about/submissions).

Статьи, оформление которых не соответствует указанным требованиям, к публикации не допускаются.

ОБРАЗЕЦ

Название статьи (на русском языке)

Таблица 1. Авторы (на русском языке)

Порядковый номер автора статьи	Фамилия	Имя полностью	Отчество полностью (если имеется)	Должность	Ученая степень	Телефон (без скобок, пробелов и дефисов)	Электронная почта	Номера организаций, которые представляет автор (из таблицы 2)
1	Иванов	Иван	Иванович	доцент	PhD	+57771114455	my_mail@mail.ru	1, 2
2	Петров	Петр	Петрович	зав. лаб.	к.ф.-м.н.	+69992223366	my_mail@google.com	1

Таблица 2. Организации (на русском языке)

Порядковый номер организации	Наименование	Полный почтовый адрес (индекс, страна, город, улица, дом)	Официальный веб-сайт (если имеется)
1	Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева	010008, Республика Казахстан, г. Нур-Султан, ул. Сатпаева, 2	www.enu.kz
2	Астанинский филиал Института ядерной физики МЭ РК	010008, Республика Казахстан, г. Нур-Султан, пр. Абылай хана, 2/1	www.inp.kz

Название статьи (на казахском языке)

Таблица 1. Авторы (на казахском языке)

Мақала авторының реттік нөмірі	Тегі	Толық аты	Әкесінің толық аты (болса)	Лауазымы	Ғылыми дәрежесі	Телефоны (жақшасыз, бос орынсыз және дефиссіз)	Электрондық поштасы	Автор ұйымдарының нөмірлері (2-кестеден)
1	Иванов	Иван	Иванович	доцент	PhD	+57771114455	my_mail@mail.ru	1, 2
2	Петров	Петр	Петрович	зертхана меңгерушісі	ф.-м.ғ.к.	+69992223366	my_mail@google.com	1

Таблица 2. Организации (на казахском языке)

Ұйымның реттік нөмірі	Атауы	Толық пошталық мекенжайы (индекс, ел, қала, көше, үй)	Ресми веб-сайт (болса)
1	Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті	010008, Қазақстан Республикасы, Нұр-Сұлтан қ., Сәтпаев көшесі, 2	www.enu.kz
2	ҚР ЭМ Ядролық физика институтының Астана филиалы	010008, Қазақстан Республикасы, Нұр-Сұлтан қ., Абылай хан даңғылы, 2/1	www.inp.kz

Название статьи (на английском языке)

Таблица 1. Авторы (на английском языке)

Order number of author's article	Surname	Full Name	Full Middle Name (if any)	Position	Academic degree	Telephone (free of brackets, gaps and hyphens)	E-mail	Numbers of organizations representing by author (from Table 2)
1	Ivanov	Ivan	Ivanovich	Associate professor	PhD	+57771114455	my_mail@mail.ru	1, 2
2	Petrov	Peter	Petrovich	Chief of laboratory	Cand. of Phys. and Math. Sc.	+69992223366	my_mail@google.com	1

Таблица 2. Организации (на английском языке)

Order number of organization	Title	Full post address (zip code, country, city, street, house)	Official web-site (if any)
1	L.N. Eurasian National University	010008, Republic of Kazakhstan, Nur-Sultan, Satpayev st. 2	www.enu.kz
2	Astana Branch of the Institute of Nuclear Physics ME RK	010008, Republic of Kazakhstan, Nur-Sultan, ave. Abylai Khan, 2/1	www.inp.kz

Примечание: если информация отсутствует – оставляйте соответствующие ячейки таблицы пустыми.

Ответственный секретарь к.ф.-м.н. В.А. Витюк
тел. +7 (722-51) 3-33-35, E-mail: VITYUK@NNC.KZ

Технический редактор И.Г. Перепелкин
тел. +7 (722-51) 3-33-33, E-mail: IGOR@NNC.KZ

Адрес редакции: 180010, Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 2Б
https://journals.nnc.kz/jour

© Редакция журнала «Вестник НЯЦ РК», 2024

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
180010, Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 2Б

