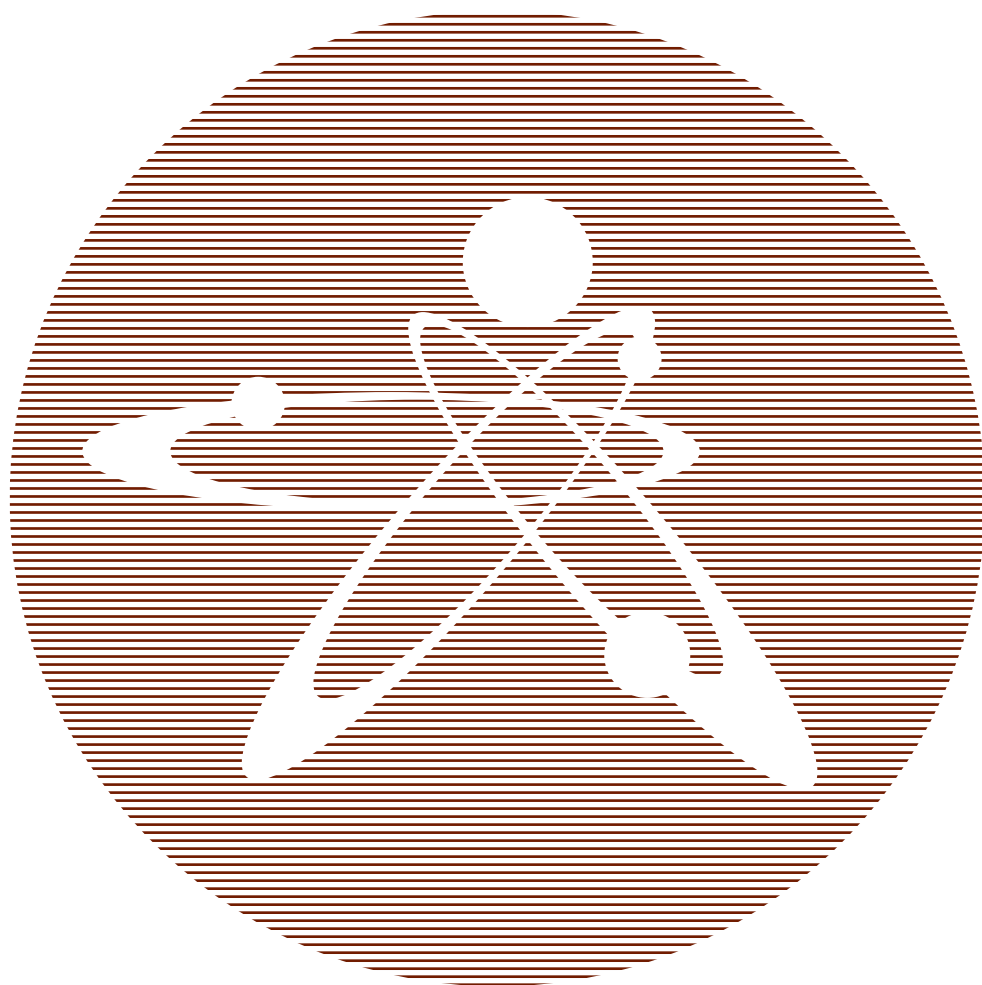


2017
ВЫПУСК 3

ISSN 1729-7516

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ВЕСТНИК



Вестник НЯЦ РК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 3(71), СЕНТЯБРЬ 2017

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,
д.т.н. БАТЫРБЕКОВ Г.А., д.ф.-м.н. БУРТЕБАЕВ Н.Т., доктор инженерии ВИЕЛЕБА В.К. (Польша),
к.ф.-м.н. ВИТЮК В.А., к.ф.-м.н. ВУРИМ А.Д., д.т.н. ГРАДОБОВЕВ А.В. (Россия), ЛУКАШЕНКО С.Н.,
д.ф.-м.н. МАКСИМКИН О.П., д.ф.-м.н. МИХАЙЛОВА Н.Н., к.г.-м.н. ПОДГОРНАЯ Л.Е.,
д.ф.-м.н. СОЛОДУХИН В.П., д.ф.-м.н. ТАЖИБАЕВА И.Л., профессор ФУДЖИ-Е (Япония)

ҚР ҰЯО Жаршысы

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ
МЕРЗІМДІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛЫ

3(71) ШЫҒАРЫМ, ҚЫРҚҮЙЕК, 2017 ЖЫЛ

NNC RK Bulletin

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

ISSUE 3(71), SEPTEMBER 2017

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

THE EXPERIMENTAL PROGRAM YALINA TO SUPPORT THE PROJECTS OF THE SUBCRITICAL SYSTEMS DRIVEN BY EXTERNAL NEUTRON SOURCES Hanna Kiyavitskaya.....	5
НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПО СХЕМЕ «SHEAR PUNCH» ОБЛУЧЕННЫХ НЕЙТРОНАМИ РЕАКТОРНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ Нұрғали Е.Е., Рубан С.В., Максимкин О.П.	11
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАСПЫЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ Mo, W И ГРАФИТА ИОНАМИ АРГОНА Алдабергенова Т.М., Козырева М.С., Карпиков А.Н., Кислицин С.Б., Уралов М.К.....	17
РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ПОДДЕРЖКУ ВНУТРИРЕАКТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТВЭЛОВ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ Витюк Г.А., Вурим А.Д., Котов В.М., Витюк В.А., Жанболатов О.М.	24
ВЛИЯНИЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОРИУМА БЫСТРОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА Скаков М.К., Дерявко И.И., Мухамедов Н.Е., Кукушкин И.М.	31
МЕХАНИЧЕСКОЕ СПЛАВЛЕНИЕ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ Ti-Al НА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА VT1-0 Сагдолдина Ж.Б., Скаков М.К., Виелеба В.	37
АНАЛИЗ ПРОЕКТНЫХ АВАРИЙ НА РЕАКТОРЕ ИВГ.1М Байгожина А.А., Иркимбеков Р.А., Жагипарова Л.К.	45
ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИГР С ТОПЛИВОМ НИЗКОГО ОБОГАЩЕНИЯ Бекмагамбетова Б.Е., Вурим А.Д., Котов В.М., Пахниц А.В., Иркимбеков Р.А., Байгожина А.А., Жагипарова Л.К., Мурзагалиева А.А.	51
АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РЕАКТОРА ИВГ.1М С ТОПЛИВОМ НИЗКОГО ОБОГАЩЕНИЯ Жагипарова Л.К., Котов В.М.	55
МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКТОРА ИВГ.1М Жагипарова Л.К., Вурим А.Д., Котов В.М., Пахниц А.В., Иркимбеков Р.А., Байгожина А.А., Мурзагалиева А.А., Витюк Г.А.	59
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОГО НАТРИЯ Каражигитов Д.Б., Коровиков А.Г.	65
РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ДЕЛЕНИЙ ЯДЕР ^{235}U НЕЙТРОНАМИ ПО ИЗМЕРЕННОЙ АКТИВНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ – ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ Медетбеков Б.С., Алейников Ю.В., Попов Ю.А.	71
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОЗОННОГО УРОВНЕМЕРА КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ЖИДКОГО НАТРИЯ Тарасенко Е.В., Райханов М.Б., Сарсембаев Е.А.	76
ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ НАХОЖДЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ р. УЗЫНБУЛАК Мухамедияров Н.Ж., Койгельдинова М.Т., Лукашенко С.Н., Есильканов Г.М., Темиржанова А.Е., Шакенов Е.З.	84

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА НА СТЕПЕНЬ НАГРЕВА ТЕПЛООБМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Надырова А.Р., Степанова О.А., Елистратов С.Л. 94

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ПАРОКОМПРЕССИОННОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСА

Тоимбаев А.Б., Саматов Е.Б., Ермоленко М.В., Елистратов С.Л. 98

ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ И РЕЛЬЕФ ТЕРРИТОРИИ ПРОЕКТИРУЕМОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПРИРОДНОГО РЕЗЕРВАТА «БОКЕЙОРДА» ЗАПАДНО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Салихов Т.К., Салихова Т.С., Берденов Ж.Г. 103

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПЛОДОРОДИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ГЕОЭКОСИСТЕМ ПРИГОРОДА АСТАНЫ

Салихов Т.К. 109

СПИСОК АВТОРОВ..... 114

УДК 621.039; 621.039.52

THE EXPERIMENTAL PROGRAM YALINA TO SUPPORT THE PROJECTS OF THE SUBCRITICAL SYSTEMS DRIVEN BY EXTERNAL NEUTRON SOURCES

Hanna Kiyavitskaya

*State Institution "Republic Center on Hydrometeorology, Radiation Contamination Control and Environmental Monitoring", Minsk, Belarus
e-mail: hannakiev@gmail.com*

YALINA subcritical facility was constructed to study the physics of Accelerator Driven Systems (ADS). Similar facilities are under consideration around the world with the main aim of producing power and transmuting radioactive waste. The proposed systems use high-energy proton beams for producing spallation neutrons to drive subcritical assemblies. YALINA facility is a zero power simulation of ADS consisting of two subcritical assemblies driven by a high intensity neutron source. The first facility, YALINA-Thermal, is thermal assembly using low enriched uranium fuel, polyethylene moderator, and graphite reflector. The second is the YALINA-Booster assembly consisting of fast and thermal zones with one directional coupling from the fast to the thermal zone. The fast zone is fueled with high-enriched uranium loaded in lead material. The thermal zone is fueled with low enriched uranium loaded in polyethylene moderator. The neutronics performance, kinetics parameter transmutation reaction rates of some long-lived nuclei have been studied at these facilities. The experimental methods developed for use in these systems are experimentally validated. The YALINA research program is focused on studying the usage of different fuel enrichments and core configurations without changing the subcritical assembly performance. The YALINA facility is described in this paper. Some experimental and calculated data are presented.

INTRODUCTION

Accelerator Driven Systems (ADS) are currently under consideration around the world for power production and transmutation of radioactive waste [1–3]. They utilize high-energy proton beams for producing spallation neutrons, which require high current accelerators [4–5]. It has been already demonstrated, both theoretically and experimentally [5, 6], that it is possible to investigate the ADS neutronics by using high intensity neutron sources such as a ^{252}Cf source or a deuteron accelerator using deuteron or tritium targets.

The subcritical facility YALINA was designed and constructed at the Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny, National Academy of Sciences of Belarus to study the neutronics of Accelerator Driven Systems [7, 8]. It consists of two subcritical assemblies, a neutron generator, vital support system and experimental equipment. This paper presents the YALINA-Thermal and YALINA-Booster assemblies.

I. YALINA-THERMAL

The YALINA-Thermal assembly was put into operation in the year 2000 and it has $k_{\text{eff}} < 0.98$ under any operating conditions for safety consideration. The external neutron source is a ^{252}Cf neutron source or accelerated deuterons colliding with a deuterium or tritium target for neutron production. A general view and cross section of the assembly are shown in Figures 1 and 2, respectively.

The assembly consists of 20 polyethylene subassemblies that have twelve blocks each arranged axially. The block dimensions are $80 \times 80 \times 48$ mm. The polyethylene material density is 0.923 g/cm^3 . Each subassembly has 16 holes for loading the EK-10 uranium dioxide fuel rods. The holes are arranged in square lattice with

20 mm spacing, which is found to be the optimum configuration for neutron multiplications using the EK-10 fuel with polyethylene moderator in a square lattice. Three experimental channels, EC1, EC2, and EC3 are embedded in the fuel zone. The experimental channel EC4 is located inside the lead target zone. The fuel zone is surrounded in the radial direction by a graphite reflector. There are two axial experimental channels, EC5 and EC6 and one radial experimental channel, EC7 in the graphite reflector. A borated polyethylene blocks are used on the front section of the fuel zone and organic glass sheet is used on the backside of the assembly and the front section of the graphite reflector. The main parameters of the YALINA-Thermal subcritical assembly are given in Table 1. More detail description of the assembly was done in [9].

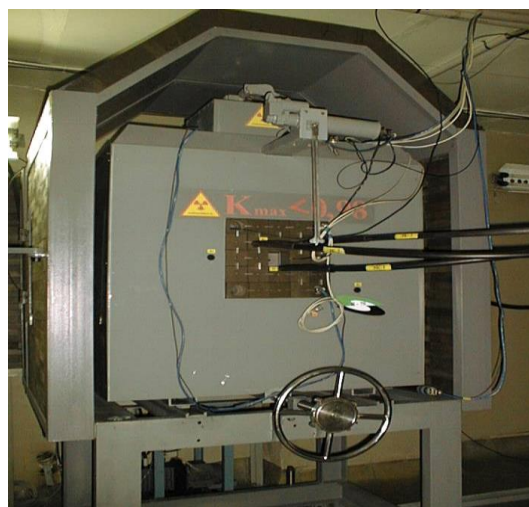
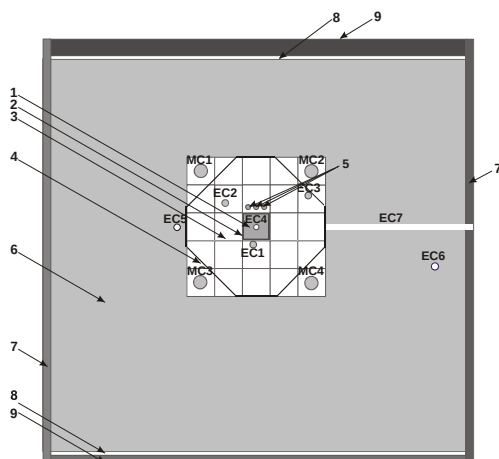


Figure 1 – General view of YALINA –Thermal assembly



1 - lead target, 2 - stainless steel frame, 3 - core, 4 - outer boundary of fuel loading, 5 - holes for location of B₄C rods, 6 - graphite reflector, 7 - organic glass sheet, 8 - cadmium layer, 9 - upper and bottom plates made of steel with low content of carbon, EC1–EC3 - experimental channels in the core, EC4 - experimental channel in target hole, MC1–MC4 - measuring channels, EC7 - radial, and EC8 - axial experimental channels in reflector

Figure 2 – X-Y cross-section of the YALINA-Thermal assembly, (65 mm < Z < 280 mm)

Table 1. YALINA-Thermal Assembly Main Parameters

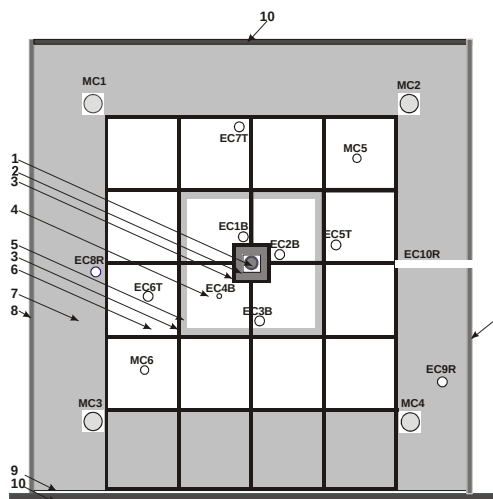
Target Zone	
Material	Pb
Dimensions, mm	78×78×645
Density, g/cm ³	11.34
Fuel Zone	
Moderator block dimensions, mm	80×80×576
Maximum number of fuel rods per block	16
Fuel rod pitch, mm	20
Fuel material	UO ₂ +MgO
Fuel material density, g/cm ³	5.042
Fuel enrichment	10 %
Fuel material composition, weight fractions:	
– ²³⁵ U	0.079691
– ²³⁸ U	0.728557
– ¹⁶ O	0.142022
– Mg	0.049730
Clad outer diameter, mm	10
Clad thickness, mm	1.5
Clad material	Aluminum alloy
Moderator	Polyethylene
Moderator density, g/cm ³	0.923
Hole diameter, mm	11
Number of experimental channels	4
EC1-EC3 Experimental channels diameter, mm	24
EC4 Experimental channel diameter, mm	11
Graphite Radial Reflector	
Density, g/cm ³	1.67
Thickness, mm	310, 400, 526
Reflector Experimental channels	
Experimental channels:	
– Axial channels	3
○ axial channel diameter, mm	24
– Radial channel	1
○ radial channel diameter, mm	24
Organic Glass Sheet	
Organic glass density, g/cm ³	1.19
Organic glass thickness, mm	4
Axial Shielding	
Material	Borated polyethylene
Density, g/cm ³	0.983

II. YALINA-BOOSTER

The YALINA-Booster subcritical assembly has been designed to have both fast and thermal neutron spectra within a single configuration. It has been operational since 2005 with $k_{\text{eff}} < 0.98$. A general view and cross section of the assembly are shown in Figures 3 and 4, respectively.



Figure 3 – General view of YALINA-Booster assembly



1 - deuteron beam tube, 2 - inner fast (booster) zone with $U_{\text{met.}}$ of 90 % enrichment in lead, 3 - stainless steel frame, 4 - outer fast (booster) zone with UO₂ of 36 % enrichment in lead, 5 - thermal neutron absorber, $U_{\text{met.}}(\text{nat.}) + \text{B}_4\text{C}$, in lead, 6 - thermal zone with UO₂ of 10 % enrichment in polyethylene, 7 - graphite reflector, 8 - organic glass sheet, 9 - Cd layer, 10 - steel with low content of carbon, EC1B–EC4B - experimental channels in booster zone, EC5T–EC7T - experimental channels in thermal zone, MC1–MC4 - measurement channels in reflector, MC5–MC6 - measurement channels in thermal zone

Figure 4 – X-Y cross-sectional view of the YALINA-Booster assembly

It is driven by an external ²⁵²Cf neutron source or accelerated deuterons colliding with a deuterium or tritium target for neutron production. The assembly has a central fast neutron zone surrounded by a thermal neutron zone. The fast zone (the booster zone) multiplies the external neutrons through the fission reactions of highly enriched uranium (HEU) and (n,xn) reactions of lead. The neutrons leak to the surrounding thermal zone.

Between the two zones, there is an interface, called “valve” zone, consisting of two layers. The inner layer has metallic natural uranium rods and the outer layer has boron carbide rods that absorb thermal neutrons. Such “valve” zone enables fast neutrons to penetrate into the thermal zone and prevents thermal neutrons from entering the fast (booster) zone from the thermal zone.

The whole assembly is surrounded by a graphite reflector and borated polyethylene wall in the radial and axial directions, respectively. The radial reflector and the backside of the thermal zone are covered by organic glass sheet. There are four axial experimental channels (EC1B, EC2B, EC3B, and EC4B) in the fast zone, three axial experimental channels in the thermal zone (EC5T, EC6T, and EC7T), two axial experimental channels in the reflector (EC8R, EC9R), and one radial experimental channel in the reflector zone (EC10R). The experimental channels are shown in Figures 3 and 4. More detail description of the assembly was done in [9].

III. EXPERIMENTAL EQUIPMENT

The YALINA experimental equipment consists of several detectors including a ^3He -detector, fission chambers, and data acquisition system. The ^3He detector is fabricated by CANBERRA, a model number 05NHI/IK. The filling gas consists of 8 bar ^3He and 2 bar Kr. The gas chamber length and diameter are 10 and 9 mm, respectively. The wall thickness of the gas chamber is 0.5 mm and it is made of Ni (73 %) and Cu (27 %) alloy. The fission chambers have different sizes and sensitivities and used in the experimental measurements. The main parameters of the fission chambers are given in Table 2.

IV. YALINA EXPERIMENTAL PROGRAM

The YALINA Experimental program is developed to study the neutronics aspects of accelerator driven systems including kinetics characteristics, subcriticality monitoring methods, neutron spectra, neutron flux spatial distribution as a function of time, transmutation reaction rates of different isotopes. The useful experience was gained during the program of theoretical and experimental investigations performed since 2001 at the facility. The investigations on neutronics and kinetics of ADS had performed in the frame of the State scientific programs and the international projects. Some analytical and experimental results from the YALINA facility obtained in the frame of the ISTC Projects B-070, B-1341 and B1732 are presented below.

The objectives of the ISTC Project # B-070 (1998–2005) “Experimental and theoretical investigations of the peculiarities of transmutation of long-lived fission products and minor actinides in a subcritical assembly driven by a neutron generator”:

- experimental confirmation of a possibility of usage of low energy ion accelerators to investigate ADS neutronics and characteristics of ADTT;
- design, construction, and operation of a subcritical facility with thermal neutron spectrum driven by neutron generator;
- experimental investigation of sub-critical systems driven by external neutron sources for transmuting long lived fission products and minor actinides.

Figure 5 shows the experimental and calculated $\text{He}^3(n,p)$ reaction rate distribution in the experimental channel EC2 of the YALINA-Thermal assembly loaded by 280 EK-10 fuel rods with ^{252}Cf -source. MCNP 4C code [10] was used to calculate the neutronics of the assembly. A good agreement between experimental and calculated data can be seen.

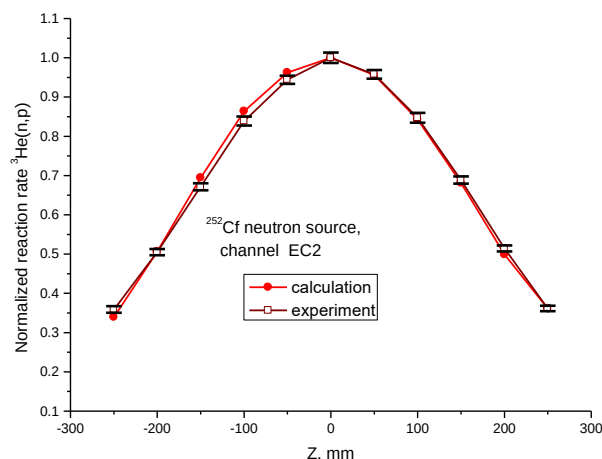


Figure 5 – Experimental and calculated $\text{He}^3(n,p)$ reaction rate distribution in the experimental channel EC2 (280 EK-10 rods) with ^{252}Cf -source

Figure 6 presents experimental axial neutron flux distributions in the experimental channels EC1, EC2 and EC3 of the core with ^{252}Cf neutron source located in $Z=25$ cm. The highest neutron flux density is observed in the EC1 channel, located near the neutron source, the less one is in the channel EC3 located near the graphite reflector.

Table 2. Main parameters of fission chambers CNT-5, CNT-31, and CNT-8

Fission chamber type	Diameter, mm	Detector length, mm	Sensitive detector length, mm	Isotope	Sensitive area, cm ²	Sensitive layer, (mg/cm ²)	Filling gas
CNT-5	7	70	5	^{235}U	1	1	98 %Ar 2 %N ₂
CNT-31	32	235	200	^{235}U	500	5	98 %Ar 2 %N ₂
CNT-8	7	70	5	^{238}U (99.275 %) and ^{235}U (0.72 %)	2	5	98 %Ar 2 %N ₂

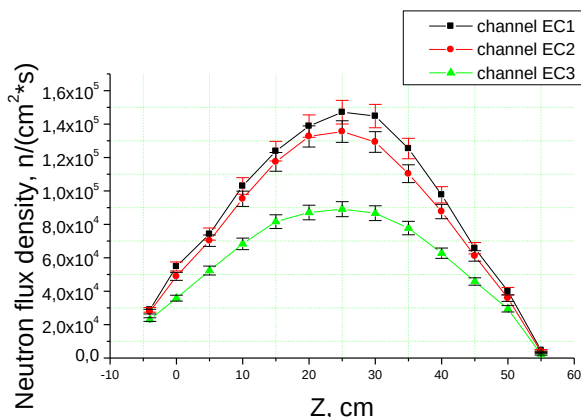


Figure 6 – Experimental axial neutron flux distributions in the experimental channels with ^{252}Cf -source ($Z=25$ cm)

Figure 7 shows the radial neutron flux density (fast with $E_n > 0.75$ MeV and thermal with $E_n < 1$ eV) in the experimental channel EC1 ($R=5$ cm) YALINA-Thermal with ^{252}Cf -source. Experimental data measured by ^3He -detector (thermal neutrons) are showed by the red line, the same ones calculated by MCNP-4C illustrated by blue line. There is a good agreement the calculated and measured characteristics.

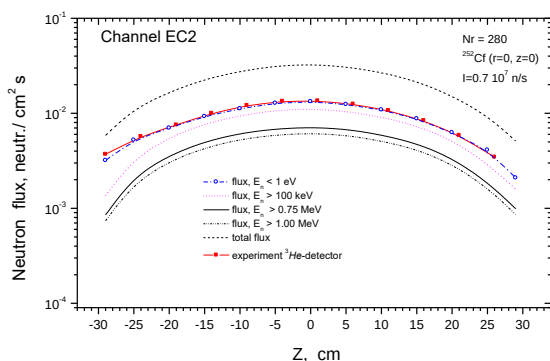


Figure 7 – Experimental distribution of neutron flux density in the experimental channel EC2 ($R= 10$ cm)

The objectives of the YALINA-B ISTC Project # B-1341 (2005-2009) and B-1732 :

- use LEU instead of HEU for the YALINA-Booster zone;
- evaluate of the consequences of converting the HEU (90 %, 36 %) to LEU ($x_5 \leq 20$ %);
- examine possible ways for maintain the original performance with HEU;
- validate the experimental methods and techniques developed for sub-criticality level measurements based on those worked out for critical systems;
- validate the codes and evaluated nuclear data libraries for ADS;
- investigate the neutron coupling between the target and the core;
- unfolding neutron spectra by threshold reaction rate method;
- measurements of transmutation reaction rates of minor-actinides and long-lived fission products.

Neutron spectra in the experimental channels of the core and the reflector for YALINA-Booster assembly per 1 neutron of ^{252}Cf -source are presented at Figure 8. It can be seen that neutron spectrum is formed in the wide energy range. There are two picks: one in thermal zone and second in the fast zone. The average energy of the neutrons in the fast zone is about 1 MeV.

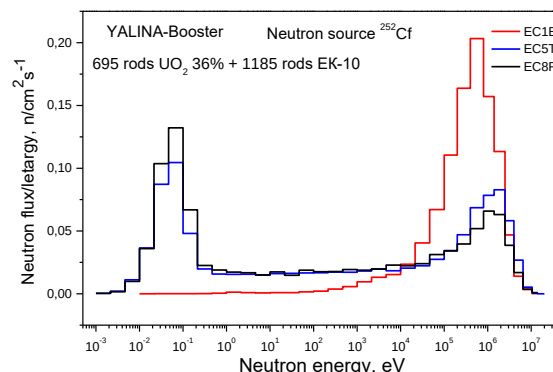


Figure 8 – Neutron spectra in the experimental channels of the core and the reflector per 1 neutron of ^{252}Cf -source

In the frame work of the International Science and Technology Center (ISTC) Project number B-1341, the conversion of the to use Low Enriched Uranium (LEU) is underway without changing the facility performance. The High Enriched Uranium (HEU) fuel zones with ^{235}U enrichment of 36 % and 90 % will be replaced by LEU fuel with ^{235}U enrichment of 21 % in two steps. The following investigations have been started for the conversion project:

- experimental and analytical studies to define the original subcritical facility performance with HEU fuel;
- develop new configurations with LEU fuel including:
 - changes the fast zone configuration;
 - optimize the thermal zone to maintain the original performance;
- license the new configurations for the following changes:
 - replace the 90 % enriched uranium fuel with 36 % enriched UO_2 ;
 - replace the 36 % enriched UO_2 with 21 % enriched UO_2 .

Thus, following configurations of the core were investigated:

- 1) 90 % $\text{U}_m(132)$ + 36 % $\text{UO}_2(563)$ + 10 % $\text{UO}_2(1141)$;
- 2) 36 % $\text{UO}_2(695)$ + 10 % $\text{UO}_2(1185)$;
- 3) 21 % $\text{UO}_2(601)$ + 10 % $\text{UO}_2(1141)$;
- 4) 21 % $\text{UO}_2(601)$ + 10 % $\text{UO}_2(1141)$ – cylindrical core.

Changing the 90 % enriched fuel with 36 % UO_2 fuel reduces the subcriticality of the assembly. Table 3 shows calculated k_{eff} as function of the number of the EK-10 fuel rods in the thermal zones when the 90 % uranium fuel is replaced by 36 % uranium fuel [11].

Table 3. k_{eff} as function of the number of EK-10 fuel rods in the thermal zone

Booster zone Enrichment	Number of EK-10 fuel rods			
	1141	1165	1177	1209
90 % ^{235}U (132 rods) and 36 % ^{235}U (563 rods)	0.97956±9	0.98418±7	0.98634±9	0.99218±7
36 % ^{235}U (695 rods)	0.96635±8	0.97116±9	0.97356±9	0.98016±9

The counting rates of the small ^3He -detector in the experimental channel ECB1 in the fast zone with ^{252}Cf -source for three configurations of the YALINA-Booster core showed at Figure 9 are reduced at the decreased of the enrichment of the fuel in the fast zone.

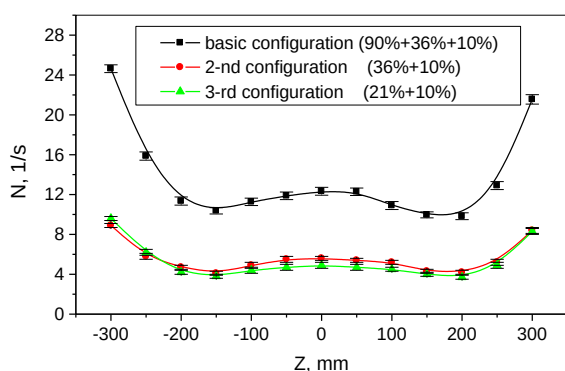


Figure 9 – Axial distribution of the counting rate of the small ^3He -detector in the experimental channel ECB1 in the fast zone with ^{252}Cf -source

REFERENCES

1. C. Bowman et al., Nucl. Instr. & Meth., A320, 336 (1992) 4.
2. M. Salvatores, I. Slesarev, M. Uematsu, Nucl. Science and Technology, 116, 1 (1994).
3. M. Salvatores, et al., Proc. ADTT'96, June 3-7, 1996, Kalmar, Sweden, V.2, P. 737.
4. C. Rubbia et al., TRADE: A full Experimental Validation of the ADS Concept in a European Perspective, AccApp'03, June 1–5 2003, San, Diego, California, USA (2003).
5. S. E. Chigrinov, H.I. Kiyavitskaya, A. M. Khilmanovich et. al., Experimental Research of the Transmutation of Long - Lived Fission Products and Minor - Actinides in a Sub-critical Assembly Driven by a Neutron Generator, In Proc. ADTTA'96-Conf. Kalmar, Sweden, 1996, P. 737–744.
6. S. E. Chigrinov, A. Kievitskaya, I. Rakhno. The Code “SONET” to calculate Accelerator Driven Systems, Proc. of the 3rd Int. Conf. on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications, June 7-11, 1999, Prague, Czech Republic, P. 12.
7. S. E. Chigrinov et al., Experimental Investigations on Neutronics of the Accelerator Driven Transmutation Technologies at the Subcritical Facility “YALINA” Proceedings of the ANA/ADTTA, Reno, Nevada, 11-15 November 2001.
8. H. Kiyavitskaya, V. Burnos, I. Serafimovich, et al. Transmutation of fission products and minor actinides in a subcritical assembly driven by a neutron generator, NATO Advanced Research Workshop “Nuclear Science and Safety in Europe, 10–16 September 2005, Yalta, Ukraine, Springer Netherlands Series B: Physics and Biophysics, P 265–274.
9. Kiyavitskaya, H. (coordinator) YALINA-Booster Benchmark. Specifications for the IAEA Coordinated Research Projects on Analytical and Experimental Benchmark Analysis on Accelerator Driven Systems and Low Enriched Uranium Fuel Utilization in Accelerator Driven Sub-Critical Assembly Systems. IAEA. – 2007. Mode of access: <http://www-nfcis.iaea.org>.
10. Briesmeister, J.F. MCNP – a general Monte Carlo n-particle transport code. Version 4 C: Technical Report LA-13709-M /J.F. Briesmeister (editor). – Los Alamos National Laboratory, USA. – 2000.
11. Talamo, A. High enriched to low enriched fuel conversion in YALINA Booster facility /A. Talamo, Y. Gohar, S. Sadovich, H. Kiyavitskaya, V. Bournos, Y. Fokov, C. Routkovskaya //Progress in Nuclear Energy. – 2014. – Vol. 70. – P. 43–53.

CONCLUSIONS

The YALINA facility has been constructed and operated at the Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny, National Academy of Sciences of Belarus in the frame of the State programs and the international cooperation with EU, IAEA, USA. YALINA is the unique installation which was designed as a prototype of real ADS. It has been used successfully to study the physics of Accelerator Driven Systems. The experimental data are used to benchmark and validate methods and computer codes for designing and licensing ADS by external neutron sources. The successful operation of this facility is a scientific contribution from the Republic of Belarus, as well as the international team from EU and USA. The current experimental program is concentrating on the conversion of the YALINA-Booster configuration to use low enriched uranium without changing its performance.

ACKNOWLEDGMENTS

This paper was prepared on the results of the International Science and Technology Center (ISTC) Projects which were supported by the European Union and the U.S. Department of Energy, Office of Global Nuclear Material Threat Reduction (NA213), National Nuclear Security Administration.

НЕЙТРОНДАРДЫҢ СЫРТҚЫ КӨЗДЕРІМЕН БАСҚАРЫЛАТЫН ШЕКТІ МЕЖЕ АЛДЫНДАҒЫ ЖҮЙЕЛЕРДІҢ ЖОБАЛАРЫНА ҚОЛДАУ КӨРСЕТУ МАҚСАТЫНДАҒЫ «ЯЛІНА» ЭКСПЕРИМЕНТТІК БАҒДАРЛАМАСЫ

Киевицкая А.И.

*«Гидрометеорология, радиоактивті ластануды бақылау және қоршаған ортаны мониторингілеу
жөніндегі республикалық орталық» мемлекеттік мекемесі, Минск, Беларусь*

Шекті меже алдындағы «ЯЛІНА» қондырғысы үдеткішті шекті меже алдындағы жүйелер (ADS) физикасын зерделеу үшін құрылды. Осыған ұқсас қондырғылар бүкіл әлемде радиоактивті қалдықтардың трансмутациясы мен энергиясын өндіру басты мақсатына арналған.

Ұсынылған жүйелер шекті меже алдындағы жинақтарды жеткізу мақсатында екінші реттік нейтрондар өндірісіне арналған жоғары энергетикалық протондар шоқтарын пайдаланады. «ЯЛІНА» қондырғысы қарқындылығы жоғары нейтрондардың көздерімен іске қосылатын екі шекті меже алдындағы жинақтарды қамтитын нөлдік қуатты үдеткіші бар шекті меже алдындағы жүйені модельдеуді жүргізуге мүмкіндік береді.

Бірінші «Жылулық ЯЛІНА» қондырғысы – төмен байытылған уран отынын, полиэтилен баяулатқышты және графитті шағылдырғышты пайдалану арқылы жасалған термиялық жинақ.

Екінші қондырғы «ЯЛІНА-Бустер» жинағы – шапшаң аймақтан жылу аймағына таралатын шапшаң және жылу аймақтарынан тұрады. Шапшаң аймақты толтыру қорғасын материалды қолдана отырып жоғары байытылған уранмен жүзеге асырылады. Жылулық аймақты толтыру полиэтилен баяулатқышты қолдана отырып төмен байытылған уран отынымен жүзеге асырылады. Бұл қондырғыларда ұзақ өмір сүретін ядролар трансмутациясының жылдамдығының нейтрондық-физикалық, кинетикалық параметрлері зерделенді.

Осы жүйелерде қолдану мақсатында әзірленген эксперименттік әдістер экспериментер өткізу арқылы негізделген. «ЯЛІНА» қондырғысының жобасы жөніндегі зерттеу бағдарламасының негізгі бағыты – әртүрлі жолмен байытылған отынның қолданылуын және активті аймақ конфигурациясын шекті меже алдындағы жинақтың техникалық сипаттамаларын өзгеріссіз зерттеу.

Бұл баяндамада «ЯЛІНА» қондырғысының сипаттамасы берілген. Эксперименттік және есептік деректер ұсынылған.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОГРАММА «ЯЛІНА» В ЦЕЛЯХ ПОДДЕРЖКИ ПРОЕКТОВ ПОДКРИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ, УПРАВЛЯЕМЫХ ВНЕШНИМИ ИСТОЧНИКАМИ НЕЙТРОНОВ

Киевицкая А.И.

*Государственное учреждение «Республиканский центр по гидрометеорологии,
контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды», Минск, Беларусь*

Подкритическая установка «ЯЛІНА» была создана для изучения физики подкритических систем с ускорителем (ADS). Аналогичные установки рассматриваются во всем мире с главной целью, для производства энергии и трансмутации радиоактивных отходов. Предлагаемые системы используют пучки высокоэнергетических протонов для производства вторичных нейтронов с целью привода подкритических сборок. Установка «ЯЛІНА» позволяет проводить моделирование подкритической системы с ускорителем с нулевой мощностью, которая включает в себя две подкритические сборки, приводимые в действие источниками нейтронов высокой интенсивности. Первая установка, «ЯЛІНА-Тепловая» – это термическая сборка с использованием низкообогащенного уранового топлива, полиэтиленового замедлителя и графитового отражателя. Вторая установка – сборка «ЯЛІНА-Бустер», состоящая из быстрой и тепловой зон с ответвлением от быстрой к тепловой зоне. Загрузка быстрой зоны осуществляется высокообогащенным ураном посредством свинцового материала. Загрузка тепловой зоны осуществляется низкообогащенным урановым топливом посредством полиэтиленового замедлителя. На данных установках изучались нейтронно-физические, кинетические параметры скорости трансмутации долгоживущих ядер. Экспериментальные методы, разработанные с целью применения в данных системах, являются экспериментально обоснованными. Основное направление исследовательской программы по проекту установки «ЯЛІНА» – это исследование применения топлива различного вида обогащения и конфигурации активной зоны без изменения технических характеристик подкритической сборки. В данной статье содержится описание установки «ЯЛІНА». Представлены экспериментальные и расчетные данные.

УДК 621.039.531

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПО СХЕМЕ «SHEAR PUNCH» ОБЛУЧЕННЫХ НЕЙТРОНАМИ РЕАКТОРНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Нұрғали Е.Е., Рубан С.В., Максимкин О.П.

Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

Представлены результаты материаловедческих исследований высокоактивных образцов стали X18N9, механические испытания которых, а также образцов стали 08X16N11M3, вырезанных из стенок отработавших чехлов ТВС реактора БН-350, проведены по схеме «Shear Punch» на установке, адаптированной для экспериментов при температурах в интервале 20–300 °С.

Ключевые слова: сталь, Shear Punch, реактор, материаловедение.

ВВЕДЕНИЕ

Методика «Shear Punch» является разновидностью метода механических испытаний «на сдвиг» и позволяет исследовать образцы нестандартной формы, а также миниатюрных размеров, что важно при работе с высокоактивными реакторными сталями и сплавами. Этот метод был использован целым рядом материаловедов [1–5] для исследования высокооблученных нейтронами образцов различных конструкционных материалов как дополнительный метод для механических испытаний «на растяжение». Получен ряд интересных результатов, раскрывающих закономерности влияния радиации на реакторные стали.

Так, авторами работ [1–3] в многочисленных экспериментах было показано, что существует корреляционная зависимость между напряжениями течения при экспериментах на растяжение и на сдвиг.

Ранее нами в работе [7] был проведен цикл механических испытаний по схеме «Shear Punch» стали X16N11M3, облученной в реакторе БН-350.

В то же время анализ литературных данных показал, что отсутствуют статьи, в которых метод «Shear Punch» использовался бы для определения механических характеристик облученных материалов при повышенных температурах, характерных для реакторов находящихся «на мощности».

В настоящей работе представлены результаты экспериментов по схеме «Shear Punch» на установке, адаптированной для проведения механических испытаний в интервале температур 20–300 °С. Исследовали образцы стали X18N9, облученные в реакторе ВВРК до флюенсов $1,9 \cdot 10^{19}$ и $9 \cdot 10^{19}$ н/см². Кроме того были деформированы образцы стали 08X16N11M3, вырезанных из стенок отработавших чехлов ТВС реактора на быстрых нейтронах БН350 и облученных до различных повреждающих доз.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рисунке 1 показан внешний вид образцов (а) и принципиальная схема устройства для механических испытаний на сдвиг «Shear Punch» (б), представляющая собой матрицу из двух параллельных пластин, между которыми зажимается плоский образец. Пластины имеют сквозное отверстие ($\varnothing=1$ мм), че-

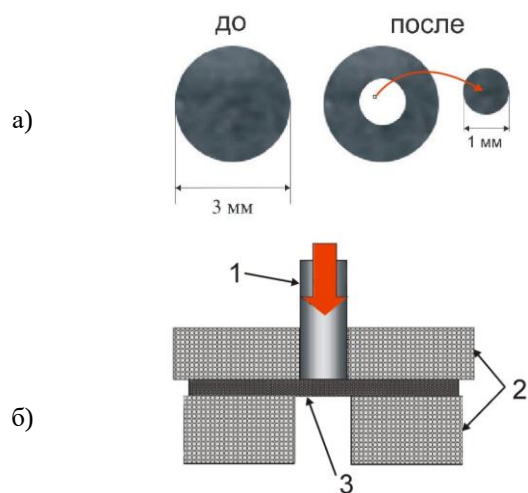
рез которые движется под нагрузкой пуансон из высокопрочной стали.

С целью проведения экспериментов при повышенных температурах изготовленная нами матрица была дополнительно оборудована керамическим нагревательным кольцом (рисунок 1, б) и снабжена термопарой, приведенной в контакт с исследуемым образцом. Температура в ходе эксперимента контролировалась терморегулятором UNIT-F51.

Нагружение пуансона и регистрация нагрузки производились на штатной испытательной машине Instron-1195. Для сопоставимости с результатами других экспериментов скорость перемещения пуансона была выбрана равной 0,5 мм/мин. Величина механического напряжения сдвига определялась по формуле [6]:

$$\tau = \frac{F}{(2\pi R_n d)}, \quad (1)$$

где $2R_n$ – диаметр подвижного пуансона, равный 1 мм, d – толщина образца.



1 - пуансон из высокопрочной стали, 2 - пластины матрицы, между которыми зажимается образец, 3 - образец

Рисунок 1. Стальной образец до и после испытания по методу «Shear Punch» (а) и принципиальная схема «Shear Punch» испытаний (б)



Рисунок 2. Внешний вид матрицы «Shear Punch» в керамическом нагревательном кольце

По окончании эксперимента в участках образца вблизи отверстия, проделанного пуансоном, с помощью феррозонда Fischer MP-30 определяли количество ферромагнитной α -фазы, и измеряли микротвердость на твердомере ПМТ-3.

Для проведения механических испытаний по схеме «Shear Punch» были использованы плоские образцы 2-х марок нержавеющей стали. Прежде всего исследовали сталь X18H9 в виде пластин толщиной 290–390 мкм, предварительно отожженных при температуре 1050 °С, в течение 30 мин. Подготовленные таким образом пробы облучали в реакторе ВВР-К до флюенсов нейтронов $1,9 \cdot 10^{19}$ и $9 \cdot 10^{19}$ н/см². Другим исследованным материалом была сталь 08X16H11M3 в виде состояния МТО., вырезанная из граней чехлов отработавших тепловыделяющих сборок (ТВС) реактора БН-350 с различных отметок по высоте, активной зоны. В таблице 1 приведены параметры облучения стали 08X16H11M3.

Таблица 1. Параметры облучения исследованных образцов стали 08X16H11M3

Маркировка ТВС	Отметка от ЦАЗ, мм	Повреждающая доза, сна	Температура облучения, °С
H-214(2)	-500	7	309
H-214(2)	0	15,6	337
№2	-300	23	300

Для экспериментов были отобраны образцы с близкими температурами облучения и разными повреждающими дозами.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты механических испытаний стали X18H9

На рисунке 3 представлены экспериментальные кривые в координатах «напряжение – перемещение пуансона», полученных в испытаниях по схеме «Shear Punch» необлученной и облученной стали X18H9 при температурах 20, 100, 250 °С.

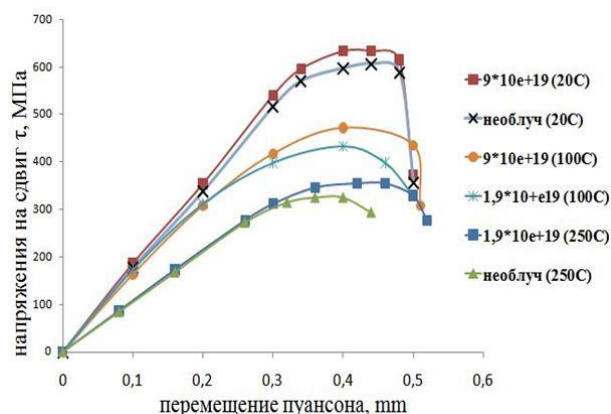
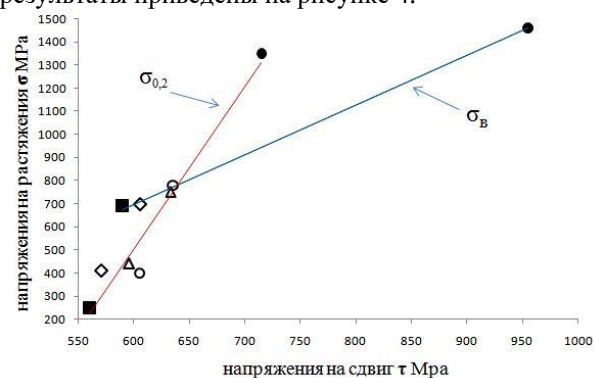


Рисунок 3. Зависимости величин напряжения «на сдвиг» от перемещения пуансона для необлученной и облученной нейтронами стали X18H9

Из рисунка 3 видно, что, как и ожидалось, нейтронное облучение привело к увеличению прочности при одинаковых температурах испытания. В то же время показано, что с ростом температуры испытания прочность стали X18H9 существенно снижается.

Используя полученные данные механических испытаний, были определены корреляционные зависимости между пределом текучести $\sigma_{0,2}$ при растяжении и напряжением течения $\tau_{0,2}$ на сдвиг, а также между σ_B при растяжении и τ_B на сдвиг. Полученные результаты приведены на рисунке 4.



■ - необлученный, ◇ - облученный $1,9 \cdot 10^{19}$ н/см², Δ - облученный $9 \cdot 10^{19}$ н/см², ○ - необлученный, отожженный при 900 °С 30 мин, ● - после холодной пластической деформации прокаткой (30–40 %), без отжига

Рисунок 4. Корреляционная зависимость между пределом текучести $\sigma_{0,2}$ при растяжении и $\tau_{0,2}$ на сдвиг, и пределом прочности σ_B при растяжении и τ_B на сдвиг для стали X18H9 при 20 °С

Из рисунка 4 видно, что, для пределов текучести и пределов прочности наблюдается линейная зависимость от напряжения «на сдвиг». При этом, коэффициент пропорциональности между пределом прочности «на растяжение» и пределом прочности «на сдвиг» равен 2.14 ($\sigma_B = 2,14 \tau_B$). Полученная зависимость хорошо согласуется с данными других авторов, также выполнявших эксперименты при комнатной температуре [3].

Проведение экспериментов при повышенных (100 и 250 °С) температурах показало, что прочность необлученной и облученной стали X18H9 существенно снижается с ростом температуры (таблица 2).

Таблица 2. Предел текучести $\sigma_{0,2}$ и предел прочности $\sigma_{\text{пр}}$ (МПа) для стали X18H9 по результатам испытаний «на сдвиг» в зависимости от повреждающей дозы в интервале температур 20–250 °С; количество ферро-фазы в образцах вблизи отверстия, проделанного пуансоном

Флюенс, н/см ²	Температура испытания, °С	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{\text{пр}}$, МПа	Количество α -фазы, отн. ед.
Необлученный	20	560	590	0,38
	100	390	420	0
	250	300	320	0
$1,9 \cdot 10^{19}$	20	570	610	0,68
	100	400	430	0
	250	310	360	0
$9 \cdot 10^{19}$	20	600	630	0,71
	100	420	470	0

Из таблицы 2 видно, что при 20 °С в области вблизи отверстия, вследствие сдвиговой пластической деформации, регистрируется наличие ферромагнитной α -фазы. Однако, при температурах испытания 100 и 250 °С ферро-фаза не регистрируется. Данный факт можно объяснить тем, что для стали X18H9 точка конца $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения при деформации (M_d), находится вблизи 100 °С. Также из таблицы видно, что при возрастании дозы облучения количество мартенситной α -фазы, индуцированной деформацией становится больше.

С целью определения особенностей пластической деформации в экспериментах на сдвиг были выполнены металлографические изучение поверхности образцов после механических испытаний.

На рисунке 5 представлены фотографии выходных отверстий, проделанных пуансоном в необлученной и облученной стали X18H9 при 20 и 250 °С. На каждой фотографии выделены края отверстий и контуры области пластической деформации, появившейся при прохождении пуансона через образец. Кроме того, в тех местах образца, где наиболее достоверно можно определить границы пластической деформации, произведено измерение граничной к пуансону области, подвергшейся интенсивному деформированию. Измерения проводились в 3 различных точках и затем рассчитывали среднее значение ширины кольца в микронах (рисунок 5).

Поскольку измерения проводились на образцах примерно одинаковой толщины, а диаметр внутреннего круга отверстия определяется размером пуансона (и остается неизменным), то ширина кольца (равная разности внешнего и внутреннего круга) зависит от деформационной способности материала.

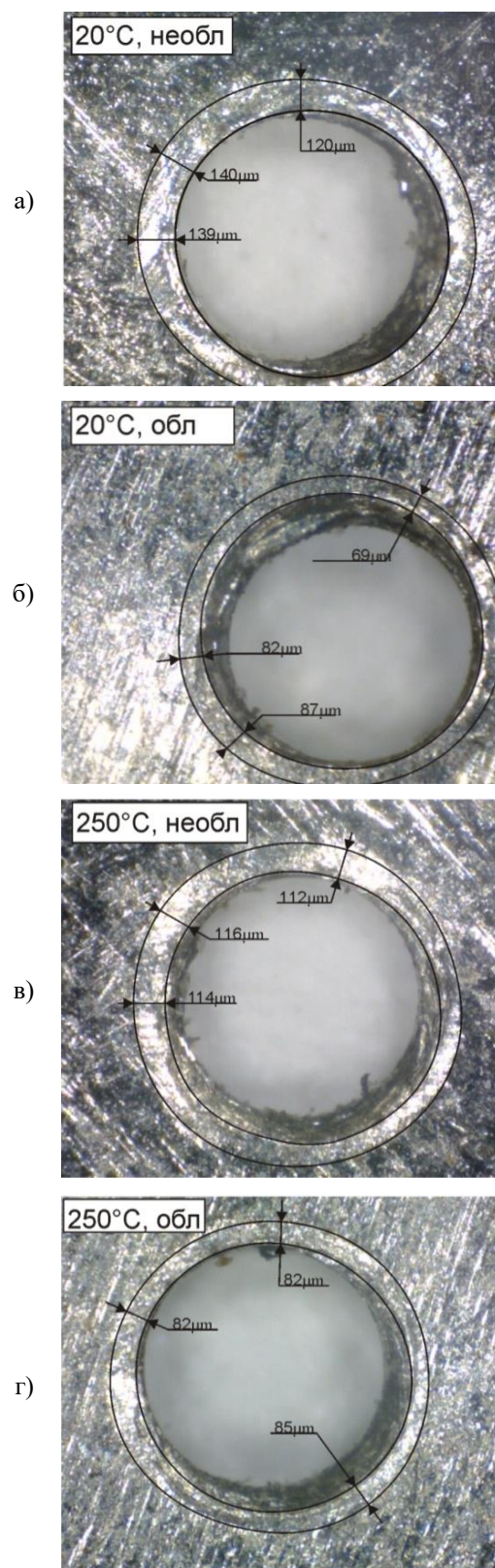


Рисунок 5. Внешний вид выходных отверстий в образцах стали X18H9. Кольцами выделены области подвергшиеся пластической деформации: а) необлученный при 20 °С, б) $1,9 \cdot 10^{19}$ н/см² при 20 °С, в) необлученный при 250 °С, г) $1,9 \cdot 10^{19}$ н/см² при 250 °С

Так, ширина «деформационного кольца» для необлученной стали при 20 и 250 °С составила 133 и 114 микрон, соответственно (рисунок 5 а, в). Если сравнить таким образом пластичность необлученной и облученной стали при 20 °С (рисунок 5 а, б) то мы увидим существенное (на 41 %) уменьшение «пластичности» в результате облучения (ширина «кольца» уменьшилась от 133 микрон до 79 микрон).

Интересными оказались также результаты металлографического изучения и измерений «деформационных колец», изображенных на рисунке 5 (г). Ожидалось, что ширина кольца при 250 °С в облученном образце будет меньше, чем в облученном и испытанном при 20 °С. Однако замеры показали что, значительного снижения пластичности при повышении температуры деформации не произошло и ширина кольца оказалась сопоставимой с шириной на рисунке 5 (б) (83 и 79 микрон соответственно). Можно предположить, что для данного масштаба образцов существует некоторая критическая толщина «кольца» (по сути области материала, вовлеченного в деформацию сдвига), ниже которой будет наблюдаться только хрупкая деформация. Эта величина очевидно связана с поликристаллической структурой стали X18N9 и должна быть пропорциональна среднему размеру зерна (~30 микрон).

Поскольку микротвердость H_{μ} является некоторым индикатором степени пластической деформации, после фотографирования образцов проводилось измерение H_{μ} в приграничной к выходному отверстию области («деформационное кольцо»). На рисунке 6 показано распределение микротвердости в «деформационном кольце» для необлученной и облученной стали X18N9.

Из рисунка 6 (а) видно что, микротвердость имеет максимальные значения у края отверстий и монотонно убывает вплоть до расстояния 100–150 микрон от края, где достигает средних значений для недеформированной области. При сравнении распределений микротвердости образцов, испытанных при 20 °С, можно увидеть, что для облученной стали X18N9 существует четкая граница деформированной области (~100 микрон), а микротвердость достигает 500 кг/мм². Более высокая микротвердость по отношению к необлученному образцу также сохраняется и при 250 °С.

Стальные образцы, испытанные «на сдвиг» до разрушения, отжигали при температуре 450 °С (30 мин) и при этом были получены следующие результаты. Все значения микротвердости (H_{μ}), характерные для материала в деформационном кольце с внешним диаметром 150 микрон выросли и особенно величины, соответствующие участкам вблизи отверстия, для облученного нейтронами и испытанного при 20 °С образце.

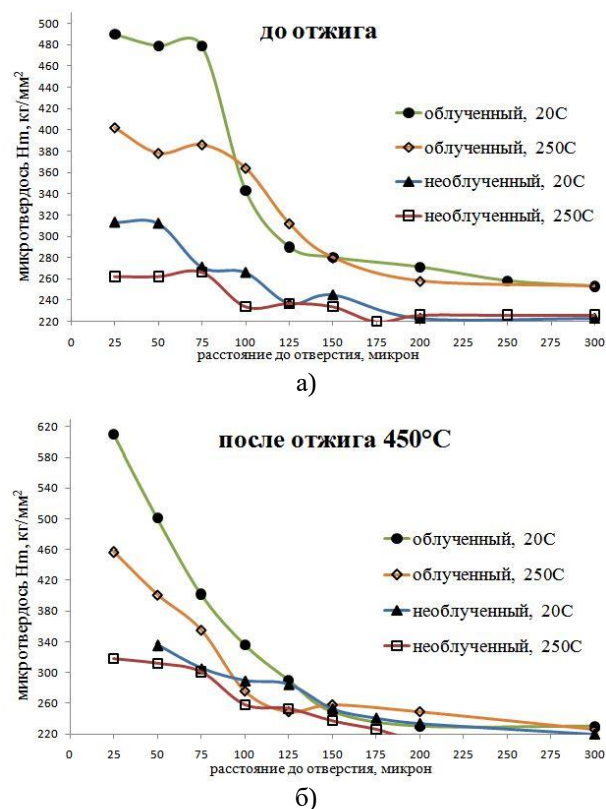


Рисунок 6. Распределение микротвердости (а) до и (б) после отжига в образцах необлученной и облученной ($\Phi = 1,9 \cdot 10^{19} \text{ н/см}^2$) стали X18N9 после SP-испытаний в зависимости от расстояния от края отверстия, проделанного пуансоном

Результаты механических испытаний стали 08X16H11M3

На рисунке 7 приведены результаты механических испытаний стальных образцов по схеме «Shear Punch» стали в интервале температур 20–300 °С. Часть образцов, облученных до различных повреждающих доз, была испытана ранее при температуре 20 °С [7].

Из рисунка 7 (а) и (б) видно, что есть общая тенденция к монотонному снижению пределов текучести и прочности с повышением температуры испытания. Также видно что, чем больше доза облучения, тем выше значения прочностных характеристик.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Одним из существенных недостатков метода «Shear Punch» является, что результаты механических испытаний «на сдвиг» оформляется в виде кривой «условное напряжения – перемещение пуансона». В нашей работе мы попытались исправить эту слабую сторону, проведя постдеформационные исследования материала вблизи отверстия. Задачей было определить величины t – толщины образца и Δd – толщины деформированной области с тем чтобы рассчитать степень деформации по формуле:

$$\varepsilon = \Delta d / t. \quad (2)$$

С учетом этого для стали X18H9 были построены экспериментальные кривые, которые приведены на рисунке 8 в координатах «напряжения – деформация».

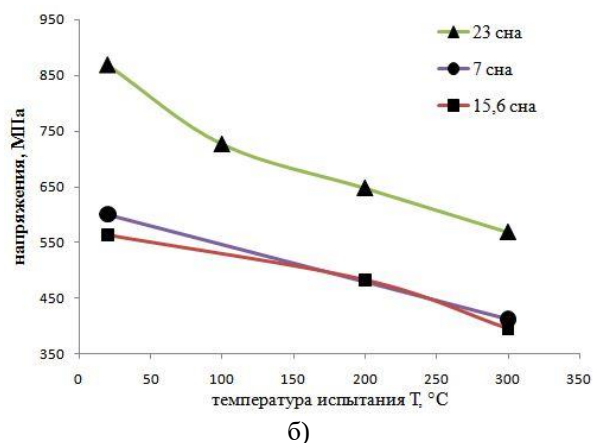
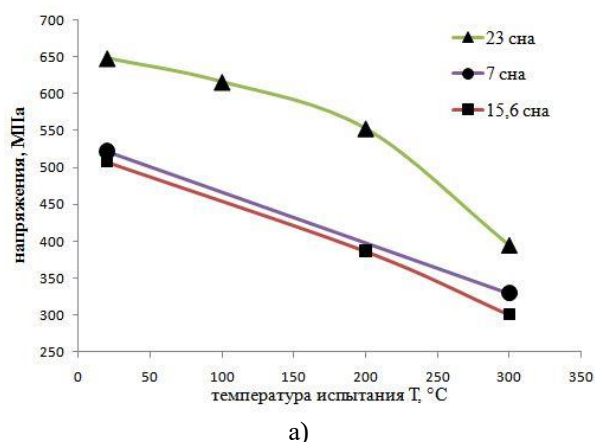


Рисунок 7. Предел текучести (а) и предел прочности (б) стали 08X16H11M3, определенные для различных температур испытания и повреждающих доз в экспериментах по методу «Shear Punch»

Из рисунка 8 видно, что в результате облучения и при увеличении температуры испытания пластичность были, определены в экспериментах «Shear Punch», снижается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев М.Н., Максимкин О.П., Матесов Д.С., Чакров П.В. Shear Punch – новый прибор и метод определения механических свойств высокоактивных материалов // Вестник НЯЦ, выпуск 4, декабрь 2001 г., стр. 43–46.
2. Hankin G.L., Toloczko M.B., Hamilton M.L., Faulkner R.G. Validation of the shear punch-tensile correlation technique using irradiated materials // Journal of Nuclear Materials 258–263 (1998) 1651–1656.
3. Rabenberg E.M., Jaques B. J., Sencer B. H., Garner F. A., Freyer P.D., Okita T., Butt D.P. Mechanical behavior of AISI 304SS determined by miniature test methods after neutron irradiation to 28 dpa // Journal of Nuclear Materials 448 (2014) 315–324.
4. Garner F.A., Hankin G.L. and others An investigation into the origin and nature of the slope and x-axis intercept of the Shear Punch-Tensile Yield strength correlation using finite element analysis // Effects of radiation materials: 19th International Symposium, ASTM STP 1366, 2000, p 1018.
5. Guduru R.K., Darling K.A., Kishore R., Scattergood R.O., Koch C.C., Murty K.L. Evaluation of mechanical properties using shear-punch testing // Materials Science and Engineering A 395 (2005) 307–314.
6. G.E. Lucas, G.R. Odette, J.W. Sheckard, ASTM STP 888 (1986) 112–139.
7. Рубан С.В., Захаров М.А., Максимкин О.П. Изменение физико-механических характеристик стали 08X16H11M3 в результате высокодозного облучения в реакторе БН-350 // Вестник НЯЦ, выпуск 3, сентябрь 2015 г., стр. 51–54.

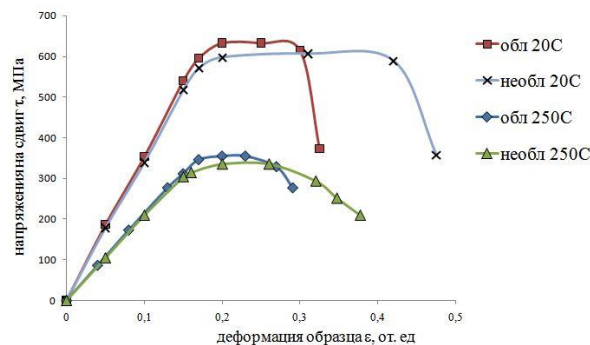


Рисунок 8. Зависимости величин напряжения на сдвиг от относительной деформации для необлученной и облученной нейтронами ($1,9 \cdot 10^{19}$ н/см²) стали X18H9

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе материаловедческих исследований облученных нейтронами сталей X18H9 (ВВР-К) и 08X16H11M3 (БН-350) с применением модифицированной методики «Shear Punch» установлено следующее:

- Впервые получены данные по пределам текучести и прочности, «на сдвиг» образцов двух сталей облученных нейтронами и испытанных в интервале температур 20–300 °С.

- В экспериментах при комнатной температуре показано, что между значениями пределов текучести и прочности, полученных в экспериментах «на растяжение» и «на сдвиг», существует корреляционная зависимость. Данный факт позволяет использовать новую методику «Shear Punch» в тех случаях, когда провести эксперименты на растяжение не представляется возможным, например, в случаях, когда вынуждены иметь дело с высокорadioактивными и миниатюрными образцами.

- Постдеформационное металлографическое изучение поверхности образцов и определение микротвердости позволило установить, что вокруг отверстий, прорезываемых пуансоном, есть области пластической деформации, по размерам и форме которых можно судить о величинах пластичности и прочности исследуемых сталей, а так же о механизмах деформации.

**НЕЙТРОНДАРМЕН СӘУЛЕЛЕНГЕН РЕАКТОРЛЫҚ БОЛАТТАРДЫҢ ЖОҒАРЫ
ТЕМПЕРАТУРАДАҒЫ МЕХАНИКАЛЫҚ СНАҚТАРДЫҢ «SHEAR PUNCH» СХЕМАСЫ
БОЙЫНША ЖАҢА НӘТИЖЕЛЕРІ**

Нұрғали Е.Е., Рубан С.В., Максимкин О.П.

Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

Болаттың жоғары радиоактивті X18N9 үлгілері мен БН-350 реакторында пайдаланылған жылу бөлгіш жинақтарының (ЖБЖ) қаптарынан кесіліп алынған 08X16N11M3 үлгілерінің 20–300 °C температура аралығындағы механикалық сынақтарының «Shear Punch» схемасы бойынша материалтану зерттеулерінің нәтижелері келтірілген.

Түйінді сөздер: болат, Shear Punch, реактор, материалтану.

**NEW RESULTS OF MECHANICAL TESTS ON THE “SHEAR PUNCH” SCHEME
OF REACTOR STEELS IRRADIATED BY NEUTRONS AT HIGH TEMPERATURES**

Y.Y. Nurgali, S.V. Ruban, O.P. Maksimkin

Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

The results of material research of mechanical tests, highly radioactive samples of Kh18N9 steel and samples of 08Kh16N11M3 steel which are cut from the walls of spent fuel assembly of the BN-350 reactor, which were carried out according to the scheme “Shear Punch” at the installation at temperatures in the range of 20–300 °C.

Key words: Steel, Shear Punch, reactor, aterial science.

УДК 539.17; 539.19

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАСПЫЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ Мо, W И ГРАФИТА ИОНАМИ АРГОНА

Алдабергенова Т.М., Козырева М.С., Карпиков А.Н., Кислицин С.Б., Уралов М.К.

Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

Экспериментально измерены коэффициенты распыления поверхности молибдена, вольфрама и графита после облучения ионами аргона с энергией 100 кэВ. Измерения коэффициентов распыления Мо и W выполнены с применением метода Резерфордского обратного рассеяния для измерения толщины распыленного слоя. Коэффициент распыления поверхности графита рассчитывался из измерений потери массы облученного графита. Сравнение результатов экспериментально полученных значений коэффициента распыления показали хорошее согласие с теоретическими расчетами.

Ключевые слова: молибден, вольфрам, графит, коэффициент распыления поверхности, ионы аргона.

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные измерения коэффициента поверхностного распыления (K_s) являются предметом внимания исследователей в течение длительного времени, и для измерения K_s используются различные методы и оборудование [1, 2]. Знание коэффициента распыления поверхности важно для многих применений, таких как очистка поверхности, получение сверхтонких пленок и других задач, в которых для этих целей используют пучки заряженных частиц. Помимо этого, знание K_s важно для конструкционных материалов ядерной техники, в частности материалов защиты первой стенки термоядерных реакторов (ТЯР), где распыление материалов является одним из ограничивающих факторов работоспособности ТЯР.

В нашей работе в качестве предмета исследований выбраны молибден, вольфрам и графит, так как эти материалы считаются перспективными для использования в ТЯР в качестве материалов защиты первой стенки и пластин дивертора ТЯР. Несмотря на довольно многочисленные измерения K_s для этих материалов (см., например, [1]), имеется заметное расхождение в результатах измерения K_s различными методами. Более того, почти все экспериментальные измерения K_s проводились в области энергий бомбардирующих частиц от 5 до 50 кэВ, а для энергий ионов ~ 100 кэВ экспериментальные данные практически отсутствуют.

Для экспериментальных измерений K_s молибдена и вольфрама мы выбрали следующую методику. Распыление поверхности проводилось тяжелыми ионами на низкоэнергетическом канале ускорителя ДЦ-60 Астанинского филиала ИЯФ. В качестве бомбардирующих частиц выбраны ионы $^{40}\text{Ar}^{5+}$, энергия которых составляет 20 кэВ на заряд, т.е. полная энергия иона Ar^{5+} составляет 100 кэВ. Толщина распыленного слоя измерялась методом Резерфордского обратного рассеяния (РОР) на ионах азота с энергией ~ 20 МэВ на высокоэнергетическом канале ускорителя ДЦ-60 в Астанинском филиале ИЯФ и на ускорителе УКП-2-1 ИЯФ в Алматы на протонах

с энергией 1 МэВ [3]. Коэффициент распыления поверхности графита измерялся весовым методом, так как использование РОР метода осложняется вследствие отслаивания графита при манипуляциях с ним.

1 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1 Образцы для исследований

Для экспериментального определения коэффициентов распыления молибдена и вольфрама распыления путем измерений толщины распыленного слоя РОР методом, были приготовлены образцы, представляющие собой алюминиевые подложки размерами 15 мм $\times$ 15 мм с покрытиями из молибдена или вольфрама, нанесенными по технологии магнетронного распыления. Распыляемой мишенью для нанесения покрытий служили диски диаметром 40 мм и толщиной 4 мм, изготовленные из молибдена, чистотой 99,93 вес. %, или вольфрама чистотой 99,9 вес. %. Осаждение покрытий проводилось при мощности магнетрона 50 Вт в атмосфере аргона, специально очищенного на геттер-распыленном титане. Давление плазменного газа при распылении составляло 0,1 Па. Толщина покрытия молибдена для половины образцов составляет ~ 600 нм; толщина покрытий второй части образцов составляет $\sim 1,1$ мкм, толщина вольфрамового покрытия ~ 400 нм, см. табл. 1 и 2.

Двухслойные образцы – алюминиевая подложка с тонким слоем Мо (или W) были выбраны по следующим причинам. Для увеличения точности измерения толщины распыленного слоя РОР методом, атомные веса подложки и материала покрытия должны значительно отличаться. В этом случае РОР спектры обратно рассеянных ионов от подложки и покрытия хорошо разделяются, и толщина покрытия может быть измерена с довольно высокой точностью – 5–7 нм. Зная флюенс бомбардирующих ионов, площадь облучаемой поверхности и результаты измерения толщины распыленного слоя молибдена (вольфрама), можно определить K_s . Молибден (атомный вес 96 а.е.м.) и вольфрам (атомный вес

184 а.е.м.) в качестве материалов покрытия и алюминий (атомный вес - 27 а.е.м.) в качестве подложки удовлетворяют вышеуказанному условию.

Толщина Mo и W покрытий была выбрана по следующим причинам: проективный пробег бомбардирующих ионов должен быть меньше толщины распыляемого материала, включая ожидаемую толщину распыленного слоя. Проективный 100 кэВ ионов Ag в молибдене составляет 40 нм, страгглинг – 24 нм; Проективный пробег 100 кэВ ионов Ag в вольфраме составляет 29 нм, разброс - 26 нм (расчеты по программе SRIM). Второе - толщина распыленного слоя материала должна быть достаточной для фиксации поверхности раздела Mo – Al (W-Al). Проективный пробег ионов азота с энергией 25 МэВ в молибдене составляет ~ 7,5 мкм и позволяет получать РОР спектры, как от покрытия, так от подложки. Проективный пробег протонов с энергией 1 МэВ в W составляет ~ 5,4 мкм и также позволяет получать РОР спектры, как от вольфрамового покрытия, так и от алюминиевой подложки. Подготовленные образцы с покрытиями из Mo (W) на алюминиевой подложке удовлетворяют этим условиям.

Для исследований коэффициента распыления графита были подготовлены образцы монокристаллического графита, размерами 20 мм × 20 мм и толщиной ~ 1 мм. В настоящее время разработаны различные марки графитов для применения в разных областях промышленности. Нами выбран монокристаллический графит, так как он обладает высокими физико-механическими свойствами – прочностью на сжатие, температурой плавления (сублимацией), электро – и теплопроводностью. Распыление графита также выполнялось на ускорителе ДЦ-60 ионами Ag с энергией 100 кэВ. Потери массы за счет распыления поверхности измерялись весовым методом на аналитических весах ОНАУС с точностью взвешивания ± 0.1 мг.

1.2 Облучение образцов Mo, W и графита ионами аргона

Облучение образцов ионами Ar^{+5} с энергией 100 кэВ проводилось на низкоэнергетическом канале ускорителя DC-60 (канал ЭЦР источника). Перед экспериментами по распылению были проведены предварительные работы. Одной из основных задач было подавление вторичной электронной эмиссии облученных образцов. Поскольку флюенс бомбардирующих ионов определялся с помощью измерений интегрального тока ионного пучка на облученной мишени, то вторичная электронная эмиссия может вызывать значительную погрешность определения флюенса. Эта проблема была решена путем размещения магнитной системы перед держателем мишени. Измеренная магнитная индукция на рабочей поверхности держателя мишени была равна ~ 570 Г, что достаточно для подавления вторичной электронной эмиссии. Вторая задача заключалась в том, чтобы изготовить специальный держатель образца для об-

лучения под углом 45°. Поскольку согласно литературным данным [1] коэффициент распыления поверхности зависит от угла падения ионного пучка, то измерения коэффициента распыления поверхности Mo были проведены при нормальном угле падения ионного пучка к облученной поверхности и под углом падения, равным 45°.

Облучение образца с Mo покрытием №1 (таблица 1) проводили при нормальном угле падения ионного пучка к поверхности, см. рисунок 1а, до флюенса облучения – $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Облучение образцов №2, №3 и №4 (таблица 1) проводили до флюенса облучения – $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Образцы №2 и №4 облучались под углом 45° к поверхности, см. рисунок 1б.

Образцы с W покрытием (образцы №1, №2 и №3, таблица 2) облучались при нормальном угле падения ионного пучка к облучаемой поверхности, ионный флюенс для образца №1, для образца №2 флюенс составлял $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, для образца №3 – $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$.

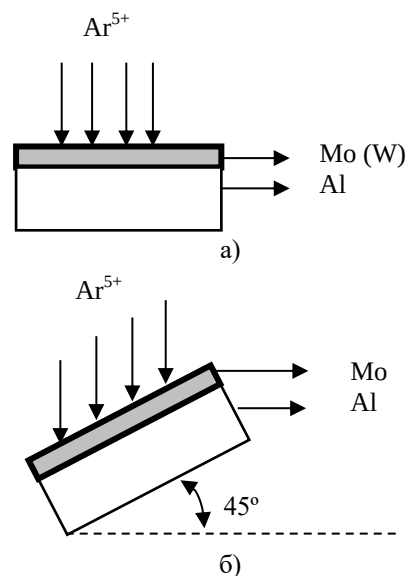


Рисунок 1. Схематическое изображение облучения ионами аргона: а – при нормальном падении ионного пучка на поверхность, б – под углом $\theta = 45^\circ$

Образцы графита облучались при нормальном угле падения ионного пучка к облучаемой поверхности, флюенс облучения составлял $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (образец №1) и $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ (образец №2), см. Таблицу 3. Во всех случаях энергия ионов аргона составляла 100 кэВ, площадь облучаемой поверхности 1 см^2 , температура облучения не превышала 200 °С.

Толщина слоя молибдена до и после облучения ионами аргона определялась по данным обработки спектров Резерфордского обоатного рассеяния ионов азота с энергией 25 МэВ на ускорителе ДЦ-60. РОР исследования толщины слоя вольфрама выполнялись на ускорителе УКП-2-1 на протонах с энергией 1 МэВ.

Вес и гидростатическая плотность графита измерялись с помощью аналитических весов ALC 80/4 с точностью измерений ± 0.0001 г.

2 РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

До экспериментов по распылению ROP методом были измерены толщины нанесенных слоев Мо и W. Более того, поскольку покрытия Мо и W наносились методом магнетронного распыления, были проведены исследования структуры и плотности молибдена и вольфрама, чтобы быть уверенными в соответствии нанесенных слоев массивному материалу. Кристаллическая структура нанесенных слоев молибдена и вольфрама, а также образцов графита были выполнены методом рентгеновской дифрактометрии с использованием рентгеновского дифрактометра Bruker D8 ADVANCE. Съемка проводилась в геометрии Брега-Брентано с использованием рентгеновской трубки с медным катодом и графитовым монохроматором на дифрагированном пучке. Дифракционная картина соответствует ОЦК решетке молибдена с достаточно высокой степенью совершенства кристаллической решетки. Постоянная решетки молибденового слоя составила $a_{Mo} = 3.1460 \pm 0.0011$ Å и согласуется с табличными данными для Мо 3.143 Å [4]. Аналогичная ситуация и для слоя вольфрама – измеренное значение постоянной решетки $a_W = 3.1625 \pm 0.0011$ Å, табличное значение – 3.164 Å [4]. Рентгеноструктурные исследования графита показали, что материал является монокристаллом графита, поэтому дифрактограмма представлена отражениями только от одной кристаллической плоскости различного порядка: (002), (004) и (006). Графит имеет гексагональную сингонию и отсутствие линий от плоскостей, которые содержат индексы hk , не позволяет однозначно определить параметры кристаллической решетки анализируемого графита, объем и размер кристаллитов.

Результаты измерения плотности Мо до облучения позволили заключить, что измеренная плотность слоя молибдена 10.1 г/см^3 в хорошем согласии со значением плотности массивного молибдена 10.2 г/см^3 [5]. Измеренное значение плотности вольфрама 19.1 г/см^3 , также согласуется с табличным значением [5]. Гидростатическая плотность графита составила 1.68 г/см^3 .

ROP измерения толщины слоев молибдена и вольфрама выполнялись, как уже упоминалось выше, до и после экспериментов по распылению. Примеры ROP спектров на ионах азота с энергией 25 МэВ слоев молибдена на алюминиевой подложке и их аппроксимация для образцов № 1 и 3 (таблица 1) до и после облучения ионами аргона с энергией 100 кэВ показаны на рисунках 2 а, б, в, г. На рисунке 2 д показан ROP спектр молибдена после облучения 100 кэВ ионами аргона после облучения до флюенса $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$.

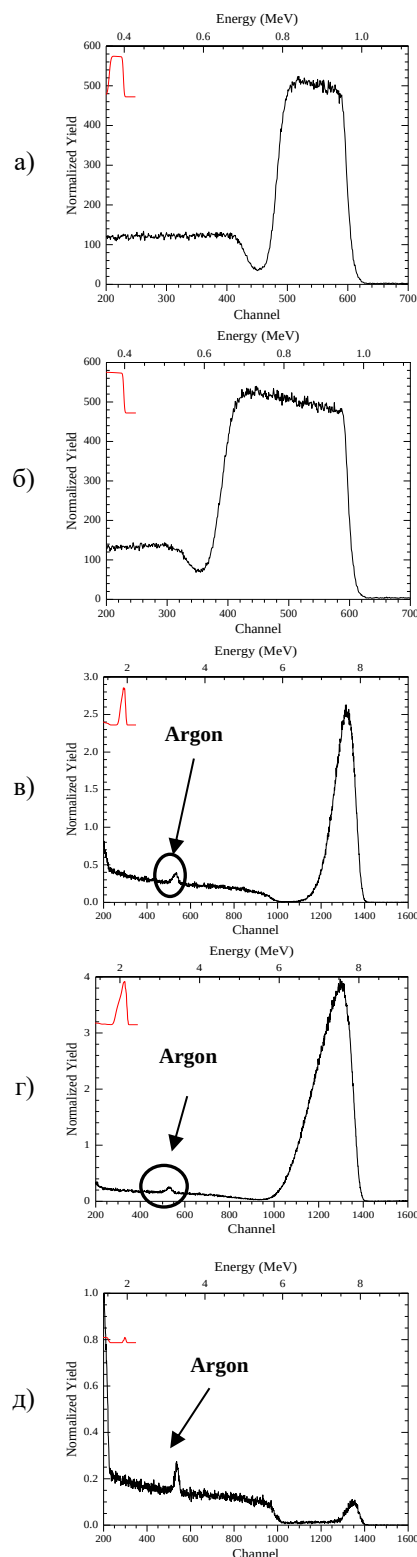


Рисунок 2. ROP спектры образцов № 1, 2, 3 и их аппроксимация: а, б – образцы №1 и №3 до облучения ионами аргона; в – образец №1 после облучения 100 кэВ ионами Ar до флюенса $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, $\Theta = 90^\circ$; г – образец №3 после облучения 100 кэВ ионами Ar до флюенса $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$, $\Theta = 45^\circ$; д – образец №2 после облучения 100 кэВ ионами Ar до флюенса $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, $\Theta = 90^\circ$

Из сравнения спектров на рисунках 2 (а), (б) со спектрами на рисунках 2 (в), (г) можно видеть, что толщина молибденового слоя (полуширина пиков) уменьшается. Также можно видеть появление пиков на рисунках 2 (в), (г), показанных стрелками от имплантированного аргона. Особо следует отметить почти полное отсутствие пика на рисунке 2 (д), что соответствует практически полному распылению слоя молибдена. Отсутствие молибденового слоя подтверждается данными по рентгеноструктурному анализу образца № 2.

РОР спектры обратно рассеянных протонов и результат их аппроксимации для образцов со слоями вольфрама на алюминии до распыления и после распыления ионами аргона с энергией 100 кэВ приведены на рисунке 3. Из сравнения РОР спектров до и после облучения на рисунках 3 явно заметно уменьшение толщины вольфрамового покрытия.

Результаты обработки спектров, т.е. измеренные толщины слоев молибдена и вольфрама до и после распыления ионами аргона, результаты определения коэффициентов распыления и сравнение с литературными данными, приведены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Расчет коэффициентов распыления K_s (число распыленных атомов на один падающий ион) рассчитывалось по формуле:

$$K_s = N_{sa}/F, \quad (1)$$

где N_{sa} – число распыленных атомов, F – флюенс бомбардирующих ионов. $N_{sa} = N_A \times \rho \times V/A$, где N_A – число Авогадро 0.6×10^{24} ат./моль; A – относительная атомная масса молибдена 96 (для вольфрама 84); ρ – плотность, для молибдена 10.2 г/см^3 (для вольфрама $\rho=19.3 \text{ г/см}^3$); $V = S \times \Delta h$, где S – облучаемая поверхность $S = 1 \text{ см}^2$, Δh – толщина распыленного молибдена (вольфрама), см. таблицы 1 и 2.

Результаты экспериментального определения коэффициентов распыления поверхности молибдена по толщине распыленного слоя, измеренного с помощью РОР при нормальном угле падения ионов аргона и под углом 45° , приведены в таблице 1. Для сравнения приведены теоретически рассчитанные значения коэффициентов распыления и экспериментальные данные, полученные другими методами. Следует отметить, что в литературе нет экспериментальных данных для ионов аргона с энергией 100 кэВ. Поэтому, в таблице приведены литературные данные для коэффициента распыления однозарядными ионами аргона с энергией 90 кэВ.

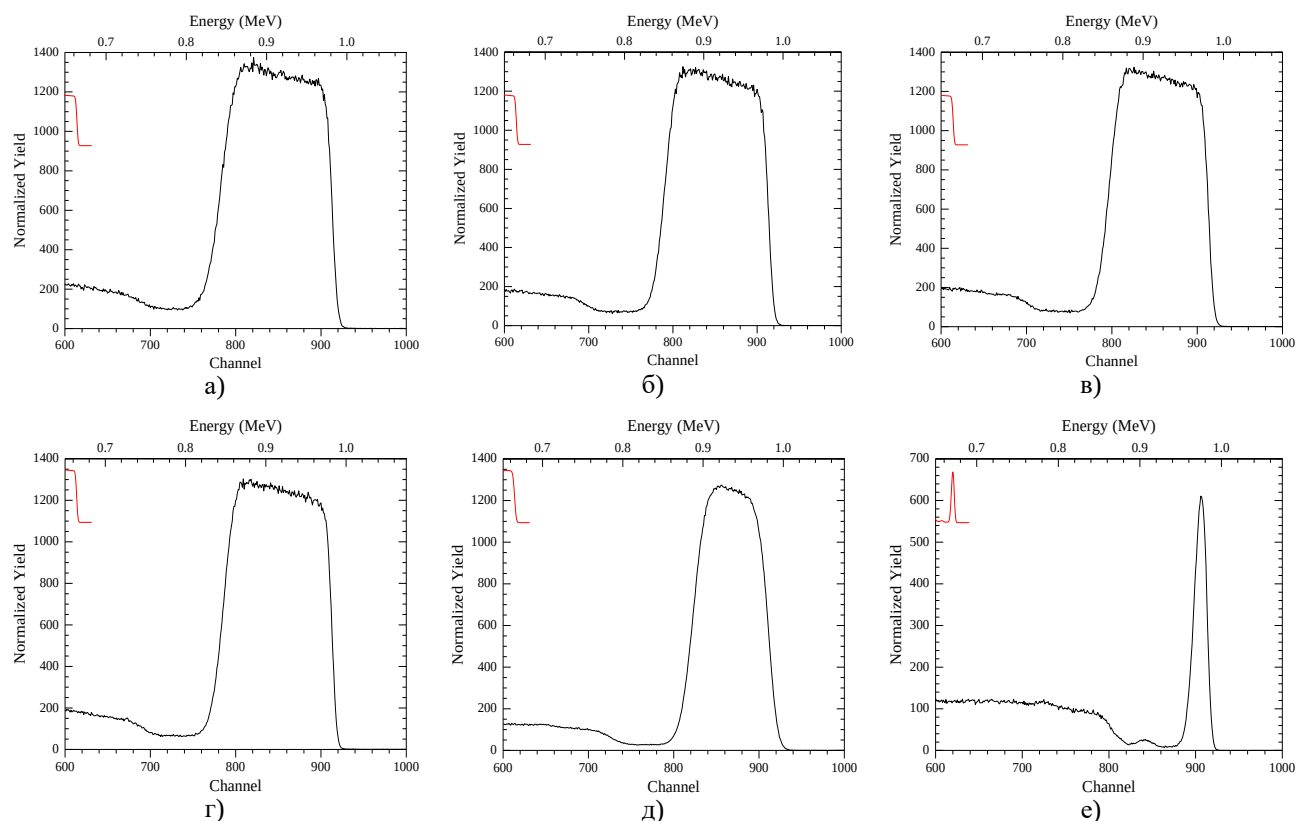


Рисунок 3. РОР спектры обратно рассеянных протонов до облучения для образцов с вольфрамовым слоем на алюминии: а – № 1; б – № 2; в – № 3; и после облучения ионами Ar^{+5} с энергией 100 кэВ; г – №1 (флюенс $5 \cdot 10^{16}$ ион/см²); д – №2 (флюенс $1 \cdot 10^{17}$ ион/см²); е – №3 (флюенс $1 \cdot 10^{18}$ ион/см²)

Таблица 1. Коэффициент распыления молибдена пятизарядными ионами аргона с энергией 100 кэВ

№	h _н , нм	h _р , нм	Δh, см ×10 ⁻⁵	V, см ³ ×10 ⁻⁵	Nsa ×10 ¹⁸	F, см ⁻² ×10 ¹⁷	Angle, град.	Ks, ат./ион	Ks* (расчет)	Ks** (экспер.)
1	625	320	3.05	3.05	1.95	0.6	90	3.3	~ 2	~ 5
2	630	0	6.30	6.30	4.03	1.2	45	3.4 !	> 2	>Ks (90°)
3	1110	220	8.90	8.90	5.69	1.2	90	4.7	~ 2	~ 5
4	1370	470	9.00	9.00	5.76	1.2	45	4.8	> 2	>Ks (90°)

! – толщина распыленного слоя превышает толщину слоя молибдена

* – ссылка [1]

** – ссылка [6] (90 кэВ Ag⁺ ионы)

Таблица 2. Коэффициент распыления вольфрама пятизарядными ионами аргона с энергией 100 кэВ

№	h _н , нм	h _р , нм	Δh, см ×10 ⁻⁵	V, см ³ ×10 ⁻⁵	Nsa ×10 ¹⁸	F, см ⁻² ×10 ¹⁷	Ks ат./ион	Ks* (расчет)	Ks** (экспер.)
1	455	450	0.05	0.05	0.03	0.01	~ 3!!	~ 2	~ 2
2	441	315	1.26 ⁵	1.26 ⁵	7.96	0.5	1.6	~ 2	~ 2
3	415	115	3.00	3.00	1.89	1.0	1.9	~2	~ 2

!! – точность POP метода при измерении толщины слоя вольфрама ~ 5–7 нм

* – ссылка [1]

** – ссылка [7] (65 кэВ Ag⁺ ионы)

Как видно из таблицы 1, явной зависимости от угла падения пучка ионов не наблюдается. Хотя согласно общепринятым представлениям и нашим теоретическим работам [8], зависимость от угла падения есть и может быть значительной. В наших исследованиях степень шероховатости поверхности достаточно велика и это приводит тому, что на различных участках угол падения может составлять от нормального до 20°. Именно за счет шероховатости поверхности в наших экспериментах не наблюдается зависимости Ks от угла падения ионного пучка. При этом, как следует из значений Ks, полученных при различных флюенсах, наблюдается существенное увеличение Ks с увеличением флюенса ионов аргона. Это также отмечается в работе [1], но подробно зависимость от флюенса ионов практически не исследована.

Коэффициент распыления вольфрама рассчитывался аналогичным способом по формуле 1. Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице 2. Из таблицы 2 явно видна зависимость коэффициента распыления вольфрама от флюенса ионов аргона.

Из проведенных исследований следует, что с ростом флюенса в два раза от $0.6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ до $1.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ коэффициент распыления поверхности молибдена увеличивается на ~30 %, а для вольфрама увеличение флюенса в два раза от $0.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ до $1.0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ приводит к росту Ks на ~16 %.

Как уже отмечалось выше, расчет коэффициента распыления поверхности графита выполнялся по данным потери веса, измеренным весовым методом. Отметим, что точность весового метода значительно уступает измерениям потери веса, выполненным POP методом. Результаты определения Ks для графита, а также вес образцов графита до облучения и после облучения приведены в таблице 3. Расчет Ks

также проводился по формуле (1). Количество бомбардирующих атомов аргона при флюенсе $\Phi = 5 \cdot 10^{17} \text{ ион/см}^2$ и площади облучаемой поверхности графита $S = 2.6 \text{ см}^2$ составит $1.3 \cdot 10^{17} \text{ ион/см}^2$, при флюенсе $1 \cdot 10^{18} \text{ ион/см}^2$, количество падающих ионов аргона составит $2.6 \cdot 10^{18} \text{ ион/см}^2$. Количество распыленных атомов Nsa оценивалось по формуле:

$$Nsa = \Delta m / (M_{\text{АЕМ}} \times A), \quad (2)$$

где $M_{\text{АЕМ}}$ – масса в граммах атомной единицы массы, $M = 1.66 \times 10^{-24} \text{ г}$, A – относительная атомная масса, для углерода $A = 12$.

Таблица 3. Вес образцов графита до и после облучения пятизарядными ионами аргона с энергией 100 кэВ и коэффициент распыления графита

№ образца	Флюенс $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ($1.3 \cdot 10^{17}$ для $S = 2.6 \text{ см}^2$)	Флюенс $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ ($2.6 \cdot 10^{18}$ для $S = 2.6 \text{ см}^2$)	Результат других авторов*
Вес (до облучения), г	0.6702	0.7986	
Вес (после облучения), г	0.6701	0.7985	
Ks	3.8	1.9	3

* – ссылка [1], (10 кэВ Ag⁺ ионы), марка графита (углерода) не указана

Из приведенных в таблице 3 значений Ks видно, что коэффициент распыления, полученный при флюенсе $5 \cdot 10^{17} \text{ ион/см}^2$, в два раза выше коэффициента распыления полученного при флюенсе $1 \cdot 10^{18} \text{ ион/см}^2$, что не согласуется с общепринятыми представлениями о зависимости Ks от флюенса бомбардирующих ионов. Причиной этого может быть недостаточная точность взвешивания. Однако, сравнение полученных оценок коэффициента распыления с экспериментальными результатами других авторов показывает, что значение коэффициента распыления $Ks \sim 2,8 \text{ ат./ион}$ (усредненное значение Ks для двух флюенсов облучения, полученных в данной работе),

по-видимому, соответствует действительному значению K_s . Согласно результатам других авторов [1] в интервале энергий ионов Ar от 0.5 до 10 кэВ для зависимости K_s от энергии характерен монотонный рост количества распыленных атомов и при энергии ионов Ar $\sim 6\text{--}10$ кэВ K_s составляет ~ 3 ат./ион. При энергии ионов Ar $\sim 30\text{--}40$ кэВ K_s достигает максимального значения и далее монотонно уменьшается с ростом энергии ионов. Это связано с тем, что растет пробег ионов в графите и, соответственно, снижается выход распыленных атомов. Таким образом, значение $K_s \sim 2\text{--}2.5$ ат./ион представляется реальным для ионов Ar с энергией 100 кэВ. Отметим также, что зависимость K_s от энергии падающих ионов аргона в данном исследовании выявить не удалось вследствие недостаточной точности весового метода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты представленных экспериментальных исследований по измерению коэффициентов распыления поверхности молибдена, вольфрама и графита можно сформулировать следующим образом:

- Разработана и внедрена на ускорителях ДЦ-60 и УКП-2-1 методика экспериментального определения коэффициента распыления поверхности металлов и сплавов, основанная на измерении толщины распыленного слоя с помощью метода Резерфордского обратного рассеяния. Показано, что результаты экспериментального измерения коэффициентов распыления согласуются с результатами других авторов и теоретическими оценками.

- Экспериментально измерены коэффициенты распыления молибдена и вольфрама пятизарядными ионами аргона с энергией 100 кэВ. Измеренный коэффициент распыления молибдена K_{sMo} составляет ~ 4 ат./ион, что согласуется с экспериментально из-

меренными K_{sMo} другими авторами (~ 5 ат./ион), полученными при облучении молибдена ионами аргона с меньшей энергией. Измерения K_{sMo} не выявили ярко выраженной угловой зависимости коэффициента распыления от угла падения пучка ионов аргона на поверхность. Это связано со значительной шероховатостью поверхности, а как показано в работе [8], различные типы шероховатости поверхности могут приводить как к увеличению, так и к уменьшению K_s . Увеличение флюенса облучения приводит к росту коэффициента распыления молибдена на $\sim 30\%$. По-видимому, это связано с разуплотнением поверхности под действием облучения ионами аргона. Измеренный коэффициент распыления вольфрама K_{sW} составляет ~ 1.7 ат./ион, что согласуется как с экспериментально измеренными K_{sW} другими авторами и теоретическими оценками (~ 2 ат./ион). При этом, также явно наблюдается зависимость K_{sW} от флюенса облучения – увеличение флюенса от $0.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ до $1.0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ приводит к росту K_s на $\sim 16\%$.

- Измеренный весовым методом коэффициент распыления поверхности монокристаллического графита K_{sC} составил ~ 2.8 ат./ион. Следует отметить, что вследствие сравнительно низкой точности метода, его можно использовать для грубых оценок K_s . Для выявления деталей процессов распыления, таких как угловая зависимость и зависимость от флюенса бомбардирующих ионов этот метод неприемлем.

Работа выполнена в рамках программы «Научно-техническая поддержка создания и эксплуатации Казахстанского термоядерного материаловедческого реактора Токамак» Министерства энергетики Республики Казахстан.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sputtering by Particle Bombardment I Physical Sputtering Single-Element Solids. Eds. R. Berisch, Springer-Verlag, Berlin-Hiedalberg-New York, 1981.
2. Sputtering by Particle Bombardment II Sputtering Alloys and Compounds, Electron and Neutron Sputtering, Surface Topography. Eds. R. Berisch, Springer-Verlag, Berlin-Hiedalberg-New York, 1983.
3. Arzumanov A.A., Borisenko A.N., Gorkachev I.D., Eliseev A.S., Kadyrzhhanov K.K., Lysukhin S.N., Platov A.V., Sapozhnikov A.V. Tandem accelerator UKP-2-1 in nuclear-physical investigations, Preprint INP NNC RK, Almaty 2002.
4. Физическая энциклопедия. Под ред. А.М. Прохорова, Москва, Советская энциклопедия, 1990.
5. Ashcroft N.W., Neil N.D., Solid State Physics, London, Cornell University 1976.
6. Switkowski Z.E., Mann F. M., Kneff D. W., Ollerhead R. W., Tombrello T. A. A new technique for the measurement of sputtering yields. // Rad. Effects – 1976 – V.29, P. 65–70.
7. Almen O., Bruce G. Collection and sputtering experiments with noble gas ions. // J. Nucl. Instrum. Methods. – 1961 – V.11 – P. 257–278.
8. Kozyreva M.S., Karpikov A.N., Kislitsyn S.B. The contribution of a surface roughness to physical sputtering of metals. // Abstracts of International Conference «Nuclear Science and its Application», Baku, Azerbaijan, October 21–24, 2014 – C. 250–251.

**Mo, W ЖӘНЕ ГРАФИТТІҢ БЕТІНІҢ АРГОН ИОНДАРЫМЕН ТОЗАҢДАНУ
КОЭФФИЦИЕНТІН ЭКСПЕРИМЕНТТІК АНЫҚТАУ**

Алдабергенова Т.М., Козырева М.С., Карпиков А.Н., Кислицин С.Б., Уралов М.К.

Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

100 кэВ энергия арқылы молибден, вольфрам және графит беттерін аргон иондарымен сәулелендіргеннен кейінгі тозаңдалу коэффициенттері эксперимент жүзінде өлшенді. Мо және W-ның тозаңдалу коэффициентін өлшеу тозаңдалған қабаттың қалыңдығын өлшеуге арналған Резерфордтық кері шашырау әдісін қолдану арқылы орындалды. Ал графит бетінің тозаңдалу коэффициенті сәулелендірілген графит массасының шығындалуын өлшеу бойынша есептелді. Эксперименттік жолмен алынған тозаңдалу коэффициенттері мәндерінің нәтижелерін салыстыру теориялық есептеулермен сай келгендігін көрсетті.

**EXPERIMENTAL MEASUREMENTS OF MOLYBDENUM, TUNGSTEN, AND GRAPHITE
SPUTTERING YIELD UNDER ARGON IONS BOMBARDMENT**

T.M. Aldabergenova, M.S. Kozyreva, A.N. Karpikov, S.B. Kislitsin, M.K. Uralov

Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

The sputtering yields of molybdenum, tungsten, and graphite surface have been experimentally measured after irradiation with argon ions at the energy of 100 keV. The measurements of Mo and W sputtering yields were performed using the Rutherford backscattering method to measure the thickness of the sputtered layer. The sputtering yield of the graphite surface was calculated from the measurements of the mass loss of irradiated graphite. The comparison of the experimentally obtained values of the sputtering yields showed a good agreement with the theoretical calculations.

УДК 621.039.68

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ПОДДЕРЖКУ ВНУТРИРЕАКТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТВЭЛОВ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

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

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

Статья посвящена расчетным исследованиям в поддержку внутриреакторных испытаний топливных элементов быстрого реактора со свинцово-висмутовым теплоносителем в исследовательском импульсном графитовом реакторе ИГР. Планируемые эксперименты направлены на исследование фрагментации топливных таблеток, а также изучение возможной химической реакции между МОКС-топливом и свинцово-висмутовой эвтектикой. В работе представлена конструкция внутриреакторного экспериментального устройства с модельным твэлом, результаты исследований нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик твэлов в ходе экспериментов, продемонстрирована возможность достижения требуемых параметров испытаний в ИГР.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всем мире проводятся научно-исследовательские работы, направленные на обоснование эффективности и безопасности реакторных систем IV поколения. Такие системы должны обладать более высокими эксплуатационными показателями, конкурентоспособностью, безопасностью и надежностью. Одним из перспективных проектов в поддержку разработки четвертого поколения быстрых реакторов со свинцово-висмутовым теплоносителем является подкритический реактор MYRRHA, основным разработчиком которого является Бельгийский центр ядерных исследований.

В 2010 году создан международный консорциум организаций, которые привлекаются к созданию реактора MYRRHA. Национальный ядерный центр Республики Казахстан является участником данного консорциума. Участие Национального ядерного центра заключается в проведении испытаний твэлов реактора MYRRHA на импульсном графитовом реакторе ИГР. Испытания будут направлены на изучение поведения топлива при отклонении режимов его работы от нормальных. Задачами планируемых экспериментов в ИГР являются исследование процесса фрагментации топливных таблеток, а также изучение возможной химической реакции между МОКС-топливом и свинцово-висмутовой эвтектикой. Для оценки возможности проведения испытаний разработана концепция экспериментов с модельными твэлами реактора MYRRHA в ИГР.

Задачи испытаний топлива

Одним из вопросов, рассматриваемых в рамках анализа безопасности реактора, является блокировка сечения в тепловыделяющей сборке (ТВС), приводящая к нарушению условий теплообмена между твэлами и теплоносителем. Причиной блокировки сечения теплоносителя может быть фрагментация топлива, вызванная локальным скачком мощности, сопровождаемая разрушением оболочки и последующим выходом частиц топлива в теплоноситель [1]. Если оболочка твэла разрушена, то эти фрагменты окажутся в потоке теплоносителя и могут заблоки-

ровать сечение ТВС. Размер осколков сильно влияет на процесс развития блокировки, поскольку маленькие фрагменты могут быть смыты, а крупные – блокировать каналы ТВС. Также интересен вопрос изучения локальных разрушений оболочки твэла со стороны химического взаимодействия оксидного топлива и жидкометаллического теплоносителя. Подобные эксперименты проводились на быстрых натриевых реакторах в 80-х годах прошлого столетия [2]: в результате контакта оксидного топлива через поврежденную оболочку твэла с натрием наблюдалось образование ураната натрия в случае диоксида урана или урано-плутоната натрия [3] в случае МОКС-топлива.

Принимая во внимание большой опыт по производству топлива из смешанных оксидов плутония и урана (МОКС-топлива), существующий в Европе, этот тип топлива является основным кандидатом на использование в реакторе MYRRHA. Преимуществом МОКС-топлива являются высокие нейтронно-физические свойства такого топлива в спектре быстрых нейтронов. Вместе с тем, в проекте рассматривается возможность использования диоксида урана. Максимальная линейная мощность твэла MYRRHA составляет ~ 250 Вт/см, что эквивалентно удельной мощности 103 Вт/г. [4] Распределение удельной мощности по высоте топливного сердечника представлено на рисунке 1а.

В процессе работы реактора MYRRHA на номинальной мощности максимальная температура топлива достигает ~ 2073 К [5]. Высокий радиальный температурный градиент возникающий в топливной таблетке (рисунок 1б) может вызывать растрескивание топлива. Особенно сильно этот эффект может проявиться в облученном топливе.

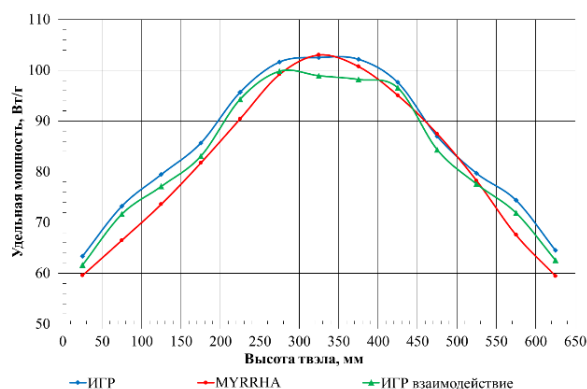
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО

На основании предварительного анализа была определена оптимальная, с точки зрения обеспечения требуемых нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик, конструкция устройства для испытаний твэлов с МОКС-топливом и с топливом из диоксида урана в ИГР.

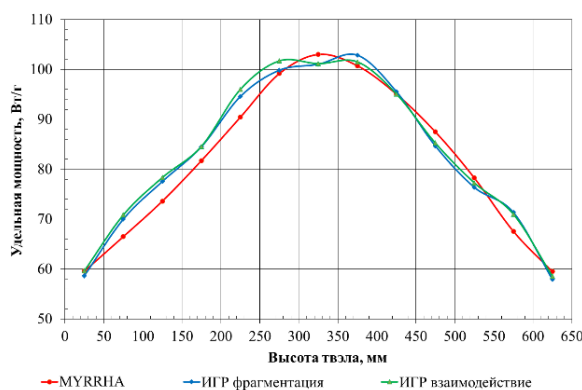
Капсула представляет собой герметичную конструкцию, состоящую из цилиндрической обечайки (поз. 6) с нижним (поз. 8) и верхним фланцем (поз. 1), чехла охлаждения (поз. 2). В зазоре между обечайкой (поз. 6) и чехлом охлаждения (поз. 2) организован тракт принудительного газового охлаждения капсулы. В качестве охлаждающего газа используется азот.

В исходной конфигурации предполагается, что твэл погружен в объем теплоносителя без обеспечения его принудительного движения.

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



а) МОКС-топливо



б) диоксид урана

Рисунок 3. Высотный профиль энергоснабжения в испытываемом твэле

На рисунке 4 представлено расчетное распределение энергоснабжения в слоях по радиусу твэла в условиях испытания в ИГР с тепловым спектром нейтронов. Нумерация слоев начинается от оси твэла.

Спектр нейтронов в ИГР является преимущественно тепловым, поэтому радиальное энергоснабжение в испытываемом твэле при использовании МОКС-топлива будет существенно отличаться от

равномерного распределения, характерного для реакторов на быстрых нейтронах.

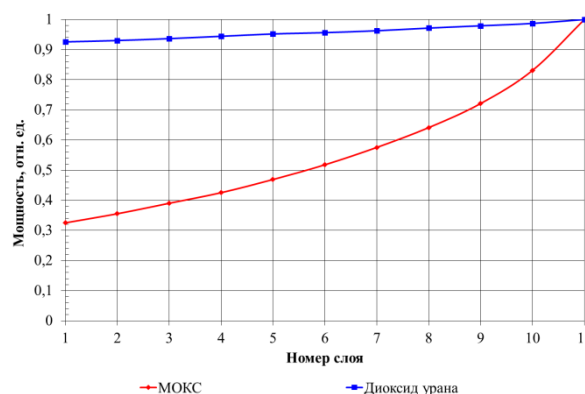


Рисунок 4. Радиальное распределение энергоснабжения в испытываемом твэле

ПРОЦЕДУРА ИСПЫТАНИЙ В ИГР

Для экспериментов по исследованию фрагментации топливных таблеток на первом этапе теплоноситель переводится в жидкое состояние, затем ИГР выводится на стационарный уровень мощности. На стационарном уровне реактор работает до достижения фрагментации топлива. Затем происходит останов реактора. После выдержки и снижения активности в экспериментальном устройстве – проведение послереакторных исследований.

Особенностью эксперимента с частичным расплавлением топлива является то, что после фрагментации таблеток реализуется вспышка мощности в твэле до уровня, при котором около 50 % топливных таблеток будет расплавлено.

В эксперименте по исследованию взаимодействия топлива и теплоносителя необходимая стационарная мощность ИГР поддерживается в течение максимально возможного времени, которое ограничено достижением рабочей температуры графитовой кладки реактора.

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ФРАГМЕНТАЦИИ ТОПЛИВНЫХ ТАБЛЕТОК

Расчет теплогидравлических характеристик экспериментального устройства в процессе экспериментов в ИГР выполнялся с использованием программного пакета ANSYS [6]. Расчетная сетка конечных объемов построена с использованием программного пакета GAMBIT [7] (рисунок 5).

В расчетах учитывалось конвективное движение эвтектического сплава, возникающее в результате возникновения градиента температуры в объеме эвтектики при ее разогреве и влияющее на процесс отвода тепла от твэла. Учет конвективного движения эвтектики в программе осуществлялся посредством решения системы уравнений Навье – Стокса с учетом уравнения неразрывности и действия силы тяжести. Для учета лучистого теплообмена между топливным сердечником и оболочкой твэла был приме-

нен метод эффективной теплопроводности [8]. На внешней поверхности капсулы задавались условия конвективного теплообмена с окружающей средой с температурой 300 К при коэффициенте теплоотдачи 5 Вт/(м²·К).

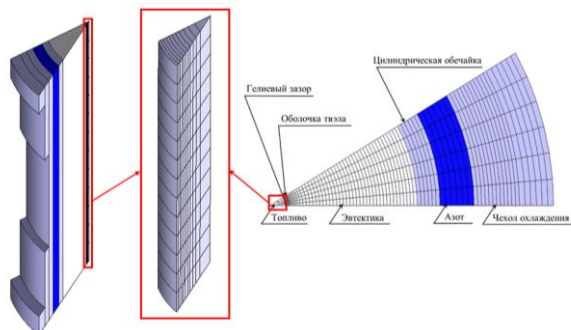


Рисунок 5. Сетка расчетной модели устройства

Энерговыделение в топливных таблетках твэла задавалось в соответствии с результатами расчета нейтронно-физических параметров устройства. Начальная температура всех конструктивных элементов принималась равной 400 К. Свойства МОКС-топлива в композиции (U_{0,7}Pu_{0,3})O₂ в зависимости от температуры были определены с помощью выражений, приведенных в [9]. Свойства диоксида урана и остальных материалов, использованные при проведении расчетов, были приняты из [–12].

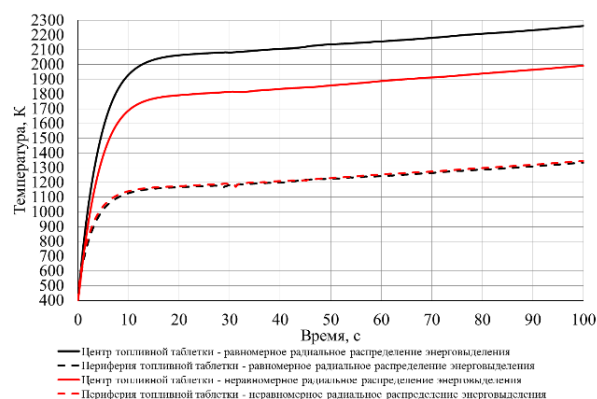
Подъем мощности смоделирован скачком с нулевого значения до значения – 14 кВт (номинальная мощность твэла реактора MYRRHA).

При использовании МОКС-топлива радиальное энерговыделение в модельном твэле существенно отличается от энерговыделения в твэле реактора MYRRHA. Это приводит к занижению температурного градиента между центром и периферией топливной таблетки, что, в свою очередь влияет на процесс фрагментации топлива.

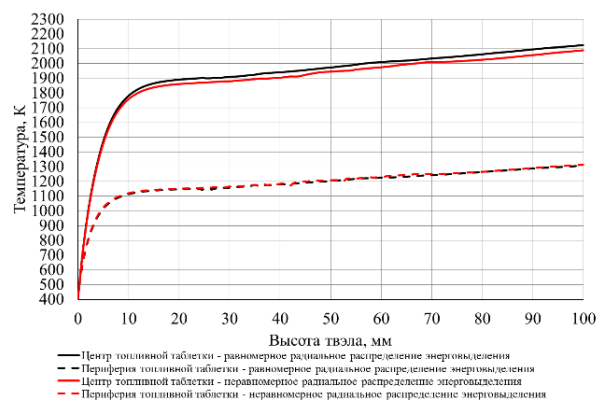
На графике приведены результаты расчета температуры в модельном твэле в испытаниях в ИГР в сравнении с температурой твэла в реакторе MYRRHA при использовании МОКС-топлива и диоксида урана (рисунок 6).

Градиент температуры при испытаниях с МОКС-топливом в ИГР составляет около 650 К при требуемом градиенте 950 К. В испытаниях с диоксидом урана значения градиента температуры в топливе практически совпадают. Установившийся режим разогрева топлива в эксперименте в ИГР достигается приблизительно к 15 секунде эксперимента, после чего разогрев продолжается со скоростью около 2,5 К/с. Максимальная температура в эвтектическом сплаве во время эксперимента достигает значения, равного 1134 К, а температура внутренней оболочки в эксперименте не превышает 1010 К. Таким образом в эксперименте будет обеспечена целостность стальных конструкций.

Требуемое заказчиком время поддержания заданных тепловых параметров твэла в эксперименте составляет около 60 секунд, после чего реализуется останов реактора ИГР.



а) МОКС-топливо



б) диоксид урана

Рисунок 6. Изменение температуры топлива в сечении 390 мм от нижнего торца твэла

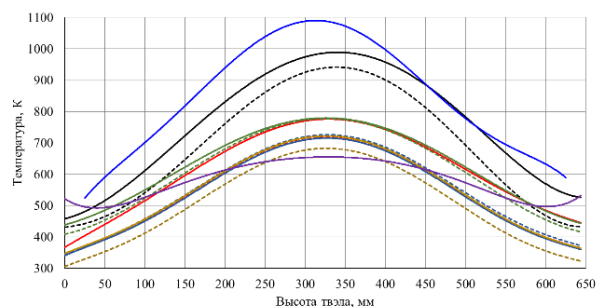
Дальнейшие исследования были направлены на поиск вариантов усовершенствования конструкции экспериментального устройства и режимов проведения эксперимента с целью приближения к требуемому градиенту температуры в МОКС-топливе. Были рассмотрены варианты с заменой свинцово-висмутового теплоносителя на натрий и воду, вариант с обеспечением расхода теплоносителя в экспериментальном устройстве, а также вариант с уменьшением проходного сечения теплоносителя в капсуле устройства.

Однако результаты расчетов показали, что принятие таких мер не позволит существенно увеличить исходный градиент температуры в МОКС-топливе (рисунок 7). Следовательно, при принятии решения о проведении экспериментов с МОКС-топливом необходимо учесть данное обстоятельство.

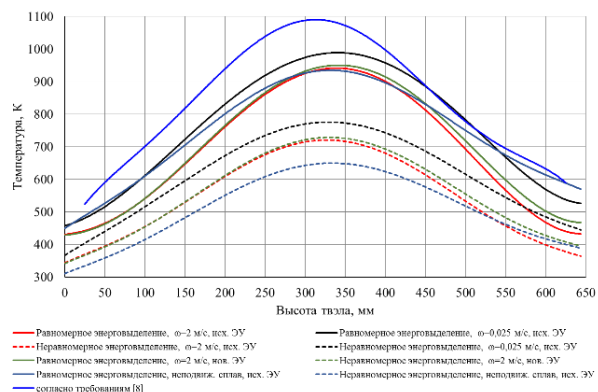
ЭКСПЕРИМЕНТ С ЧАСТИЧНЫМ РАСПЛАВЛЕНИЕМ ТОПЛИВА

В качестве возможного продолжения эксперимента с фрагментацией топливных таблеток рассма-

тривается случай быстрого ввода энергии, достаточной для расплавления около 50 % топлива. На основании решения уравнения теплового баланса была проведена оценка теплового состояния топлива при возможном продолжении эксперимента. Определено, что количество энергии, достаточное для разогрева топлива с номинальной температуры до температуры плавления и расплавления около 50 % топлива, составляет $\sim 160 \div 165$ кДж. На рисунке 8 представлено изменение температуры топлива в сечении 390 мм от нижнего торца ТВЭЛ в время такого эксперимента.



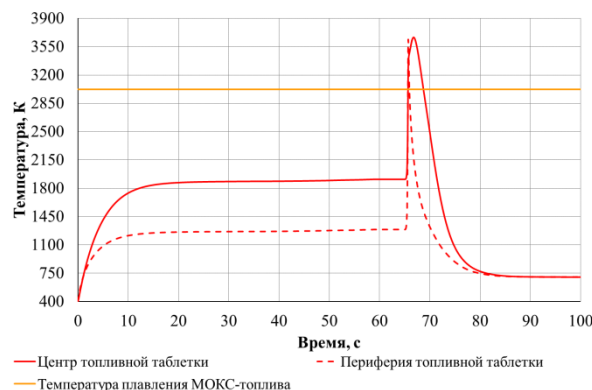
а) МОКС-топливо



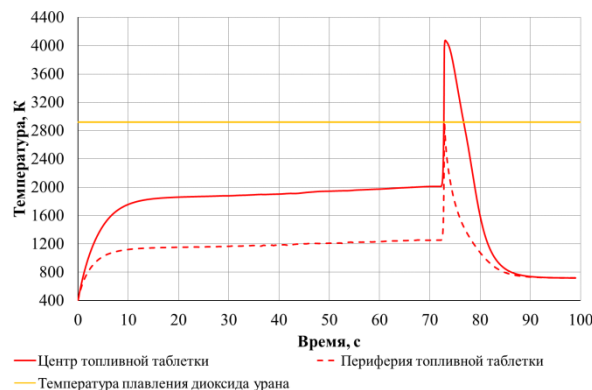
б) диоксид урана

Рисунок 7. Результаты расчетов, полученные в ходе поиска вариантов усовершенствования конструкции экспериментального устройства и режимов проведения эксперимента

Температура плавления МОКС-топлива составляет ~ 3023 К, а диоксида урана – ~ 2920 К [13]. При реализации вспышки мощности в ТВЭЛ центральная часть топливного столба достигает температуры плавления. Максимальная температура эвтектики во время проведения эксперимента составляет 1315 К, что не превышает температуру ее кипения (1943 К), а максимальная температура чехла равна 1030 К. При таких параметрах конструкция устройства обеспечивает безопасные условия для проведения эксперимента.



а) МОКС-топливо



б) диоксид урана

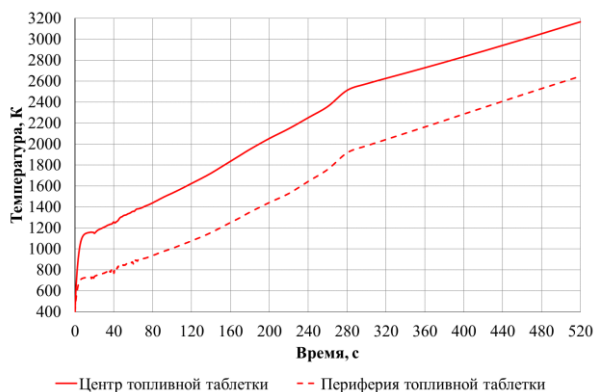
Рисунок 8. Изменение температуры МОКС-топлива и диоксида урана в сечении 390 мм от нижнего торца ТВЭЛ в эксперименте с частичным расплавлением топлива

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОПЛИВА И ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

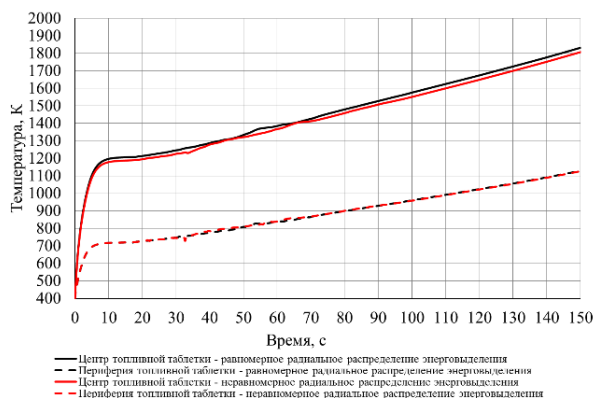
В эксперименте третьего типа, направленном на исследование взаимодействия топлива и теплоносителя, должна быть обеспечена максимальная продолжительность заданного энерговыделения в ТВЭЛ.

Максимальный возможный интеграл мощности ИГР в одном пуске ограничен значением 5200 МДж. В этой связи максимальная продолжительность облучения на требуемом уровне мощности для устройства с МОКС-топливом составит 520 с, а с топливом из диоксида – 150 с (рисунок 9).

При моделировании эксперимента с МОКС-топливом при отсутствии принудительного охлаждения температура в центре топливного столба достигает температуры плавления на 470 с от начала эксперимента. Плавление конструктивных элементов экспериментального устройства начинается раньше. С точки зрения теплового состояния экспериментального устройства при отсутствии принудительного охлаждения рациональным будет являться продолжительность эксперимента на уровне ~ 200 с. Большая продолжительность облучения будет возможна при задействовании принудительной системы газового охлаждения.



а) МОКС-топливо



б) диоксид урана

Рисунок 9. Изменение температуры в топливе в сечении 390 мм от нижнего торца твэла в эксперименте по исследованию взаимодействия топлива и теплоносителя

При моделировании эксперимента с максимальной продолжительностью облучения устройства с диоксидом урана целостность все конструктивных элементов сохраняется, запас до кипения эвтектического сплава составляет порядка 650 К.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен комплекс расчетных исследований в поддержку внутриреакторных испытаний топливных элементов быстрого реактора со свинцово-висмутовым теплоносителем в исследовательском импульсном графитовом реакторе ИГР.

Разработанная конструкция устройства обеспечивает необходимый высотный профиль мощности в твэле и требуемые условия охлаждения твэла теплоносителем. Необходимый градиент температуры в топливе в эксперименте по исследованию фрагментации топливных таблеток может быть обеспечен при использовании диоксида урана.

Технические характеристики реактора ИГР обеспечивают возможность проведения эксперимента с частичным расплавлением топлива модельного твэла MYRRHA. При реализации заданной последовательности событий сохранится целостность стальных конструкций и будет обеспечен достаточный запас до температуры кипения эвтектического сплава.

В эксперименте по исследованию процессов взаимодействия топлива и теплоносителя определено оптимальное время облучения с точки зрения теплового состояния устройства.

Таким образом, в результате выполненного расчетного анализа подтверждена возможность проведения экспериментов с твэлами реактора MYRRHA с учетом принятых допущений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Витюк, В.А. Реактор MYRRHA / Витюк В.А. // Человек. Энергия. Атом. Научно-публицистический журнал. – 2015. – №2 (24).
2. K. Schleisiek et al. The Mol-7C In-Pile Local Blockage Experiments: Main Results, Conclusions, and Extrapolation to Reactor Conditions. – Nucl. Sci. Eng., 128, pp 93–143, (1998).
3. L. Walters et al. : “Sodium Fast Reactor Fuels and Materials: Research Needs” Sandia National Laboratories (2011).
4. Bellony, F. Requirement for the experiments foreseen in the IGR reactor. / F. Bellony // SCK•CEN. REP001. MAXIMA – Grant Agreement. – 2015. – №323312.
5. Castelliti, D. «SEARCH-MAXSIMA Technical Review Meeting – Task 2.2 status» / D. Castelliti et al. // SEARCH-MAXSIMA Technical Review Meeting. – 22 April 2015. – SCK•CEN.
6. ANSYS, Inc. Products Release 16.0, 2014.
7. GAMBIT 2.4.6, Fluent inc, 2008.
8. Лобасова, М.С. Электронный учебно-методический комплекс по дисциплине «Тепломассообмен» / М.С. Лобасова, К.А. Финников и др. // Сибирский федеральный университет. – 2009. – 201–237 с.
9. Popov, S.G. Thermophysical properties of MOX and UO₂ fuels including the effects of irradiation / S.G. Popov, V.K. Ivanov, J.J. Carbajo, G.L. Yoder // Fissile Materials Disposition Program. – 2000.
10. Bobkov, V.P. Thermophysical properties of materials for nuclear engineering: a tutorial and collection of data. / V.P. Bobkov, L.R. Fokin, E.E. Petrov // IAEA. – 2008. – Vienna.
11. Чиркин, В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / В.С. Чиркин // Атомиздат. – 1968. – М., – 121–128, 291–294, 237–239 с.
12. Сталь марки 12X18H10T // Центральный металлический портал РФ URL: http://metallcheckiy-portal.ru/marki_metallov/stk/12X18H10T.
13. Maschek, W. et al. Safety Aspects of Oxide Fuels for Transmutation and Utilization in Accelerator Driven Systems / W. Maschek et al. // Journal of Nuclear Materials. – 2003. – Vol. 320, No. 3, PP. 147–155.

ЖЫЛДАМ НЕЙТРОНДАРДАҒЫ РЕАКТОРЛАРДЫҢ ТВЭЛДЕРІН КАНАЛШІЛІК СЫНАУДЫ ҚОЛДАУДАҒЫ ЕСЕПТІК ЗЕРТТЕУЛЕР

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

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

Мақала ИГР зерттеу импульстік графиттік реакторында қорғасын-висмутты жылутасымалдағышты жылдам реактордың отындық элементтерін каналішілік сынауды қолдаудағы есептік зерттеулерге арналған. Жоспарланған тәжірибелер отындық таблеткаларды фрагменттеуді зерттеуге, сондай-ақ МОКС-отыны және қорғасын-висмутты эвтектиканың арасындағы мүмкін болатын химиялық реакцияны зерттеуге бағытталған. Жұмыста моделді твэлі бар каналішілік тәжірибелік құрылғының құрылғысы, тәжірибелердің барысында твэлдердің нейтронды-физикалық және жылугидравликалық сипаттарын зерттеу нәтижелері ұсынылған, ИГР сынақтардың талап етілетін параметрлеріне жету мүмкіндіктері көрсетілген.

CALCULATIONS MADE FOR IN-PILE TESTS OF FAST NEUTRON REACTORS' FUEL ELEMENTS

G.A. Vityuk, A.D. Vurim, V.M. Kotov, V.A. Vityuk, O.M. Zhanbolatov

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

The article devotes to calculations performed in the research Impulse Graphite Reactor IGR within the in-pile tests of fuel elements of fast reactor with lead- bismuth coolant. Ongoing experiments are focused on studying fragmentation of fuel pellets and research of chemical reaction that might occur between MOX-fuel and lead-bismuth eutectics. The article demonstrates design of in-pile experimental device with model fuel element; reflects results of neutronics and thermo-hydraulic fuel elements' properties in the experiments and proves possibility to achieve required testing parameters in the IGR research reactor.

УДК 539.21: 620.193: 621.039.5

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОРИУМА БЫСТРОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА¹⁾ Скаков М.К., ¹⁾ Дерявко И.И., ²⁾ Мухамедов Н.Е., ¹⁾ Кукушкин И.М.¹⁾ Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан²⁾ Государственный университет им. Шакарима г. Семей, Казахстан

Выполнен анализ результатов измерений теплофизических свойств (температуропроводности α , удельной теплоемкости c_p и теплопроводности λ) у двух партий образцов натурального и прототипных кориумов быстрого энергетического реактора. Рассмотрены особенности измерений теплофизических свойств (ТФС) методом тепловой вспышки на дисковых образцах кориумов в установке УТФИ-2. Выявлено отсутствие закономерного влияния термоциклического воздействия, возникающего в образцах кориумов в процессе измерений ТФС, на результаты исследований температурных зависимостей теплофизических свойств кориумов в диапазоне температур от комнатной до примерно 400 °С.

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 2007 года в Филиале «Институт атомной энергии» НЯЦ РК проводятся работы, направленные на осуществление исследований ТФС таких реакторных материалов, как оксидное топливо, нержавеющие стали, расплавы материалов активных зон (кориумы) легководного и быстрого реакторов. В течение первых двух лет были выполнены [1] основные подготовительные работы: выбран метод измерений теплофизических свойств – метод «тепловой вспышки»; разработан, изготовлен и введен в опытную эксплуатацию первый вариант лабораторной установки УТФИ-2 для измерений ТФС на образцах дисковой формы; выполнены пробные измерения ТФС образцов из стали X18H10T и диоксида UO_2 при комнатной температуре, показавшие хорошее соответствие с данными литературных источников.

В 2009–2011 годах были проведены работы по выбору оптимальной конструкции малоинерционных термопар и модернизации кондуктиметра (измерительной ячейки установки), по отработке технологии изготовления дисковых образцов кориума для измерения ТФС, по оснащению установки вакуумной рабочей камерой для измерений ТФС как в вакууме, так и инертной среде.

В дальнейшем – в 2012–2014 годах – были осуществлены исследования температурных зависимостей ТФС на образцах прототипных кориумов легководного энергетического реактора в диапазоне температур от комнатной до примерно 400 °С в среде аргона [2–5]. Измерения теплофизических свойств (температуропроводности, удельной теплоемкости и теплопроводности) выполнялись на прототипных кориумах, полученных во вне реакторных экспериментах на экспериментальной установке ЛАВА-Б стенда АНГАРА и на стенде высокотемпературных материаловедческих испытаний ВЧГ-135.

В этих экспериментах впервые было обращено внимание на то, что в процессе измерений ТФС у некоторых образцов кориума наблюдается гистерезис

данных, получаемых при нагреве и охлаждении, а у большинства образцов фиксируется частичное разрушение при температурах выше 400 °С. При этом было выяснено, что разрушение образцов имеет поверхностный характер, а основной причиной такого разрушения является окисление металлических составляющих кориума легководного реактора в условиях газовой среды камеры установки УТФИ-2.

В 2015 году исследования ТФС на образцах прототипных кориумов легководного энергетического реактора сменились исследованиями ТФС на образцах натуральных и прототипных кориумов быстрого энергетического реактора. В этих исследованиях [6–10] удалось осуществить следующее: изготовить дисковые образцы натурального (выплавленного в ампуле реакторе ИГР) кориума быстрого реактора; изготовить расплавы прототипных (выплавленных в тиглях стенда ВЧГ-135) кориумов быстрого реактора и изготовить из них дисковые образцы; измерить ТФС у образцов натурального и прототипных кориумов быстрого реактора при комнатной температуре и исследовать температурные зависимости ТФС этих кориумов в диапазоне температур от комнатной до примерно 400 °С; построить усредненные по всем образцам температурные зависимости ТФС у натурального и прототипных кориумов и обосновать выявленные различия в полученных данных различиями в состояниях структур у натурального и прототипных кориумов.

Необходимо отметить, что в этих исследованиях, как и в предыдущих исследованиях с кориумами легководного реактора, у некоторых образцов в процессе измерений ТФС наблюдался такой же гистерезис данных ТФС при нагреве и охлаждении и такое же частичное поверхностное разрушение образцов при температурах выше 400 °С. Именно поэтому целью данной работы является установление характера термоциклического воздействия на состояние структуры и ТФС натурального и прототипных кориумов быстрого энергетического реактора (для достижения этой цели необходимо указать на наличие

или отсутствие закономерного влияния термоциклического воздействия на изменение ТФС кориумов).

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В работе анализировались следующие образцы материалов натурального и прототипных кориумов быстрого энергетического реактора: пять дисковых образцов материала натурального кориума (рисунок 1), полученного в эксперименте «FD» на реакторе ИГР, и шесть дисковых образцов материала прототипных кориумов (рисунок 2), полученных в серии экспериментов «TaC» на стенде высокотемпературных испытаний ВЧГ-135 (на рисунках 1 и 2 эти образцы приведены с подстрочными обозначениями, где для каждого образца сначала указано предварительное обозначение типа «FD» или «TaC», а затем в скобках их окончательные обозначения типа «НК» или «ПК»).

Образцы натурального кориума (рисунок 1) были изготовлены из полученного в эксперименте «FD» на реакторе ИГР расплава модельной ТВС, содержащей таблетки диоксида урана (общей массой около 9 кг) в оболочках из нержавеющей стали Х16Н15МЗБ. Для этого из участков расплава с преимущественно керамической составляющей были высверлены цилиндрические керны диаметром около 11 мм, из которых вырезкой, шлифовкой и полировкой были затем изготовлены дисковые образцы толщиной ~4 мм.

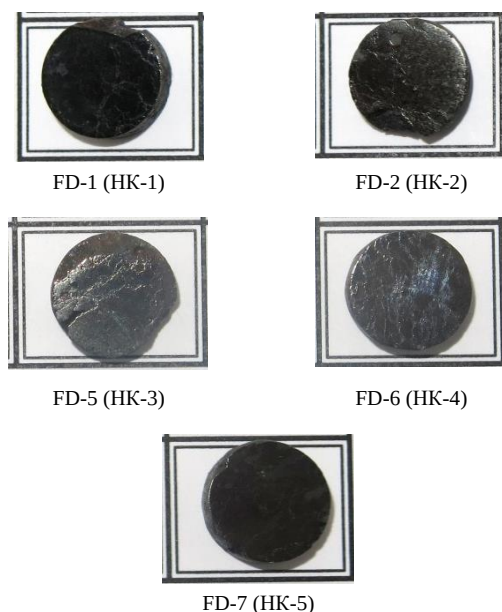


Рисунок 1. Внешний вид образцов натурального кориума (НК) быстрого энергетического реактора

Образцы прототипных кориумов (рисунок 2) были изготовлены из полученных в серии экспериментов «TaC» на материаловедческом стенде ВЧГ-135 расплавов модельных ТВС, содержавших смесь фрагментов таблеток диоксида урана (массой около 135 г) с фрагментами топливных оболочек из нержавеющей стали Х16Н15МЗБ (массой от 2 до 9 г). Для

этого из расплавов были высверлены цилиндрические керны диаметром около 11 мм, из которых, как и в случае с кернами натуральных кориумов, путем вырезки, шлифовки и полировки были изготовлены дисковые образцы толщиной ~4 мм.

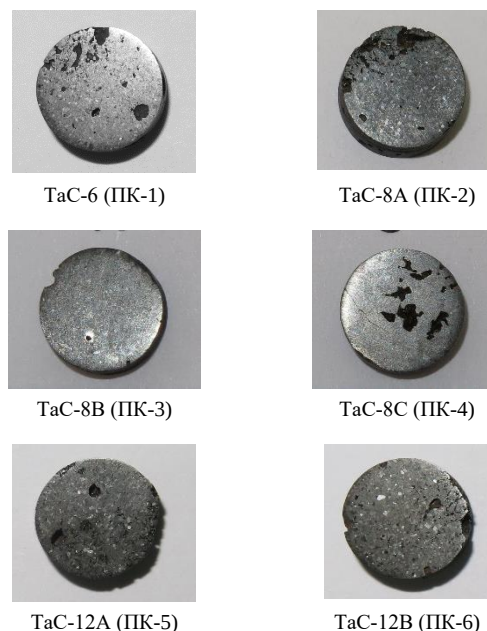
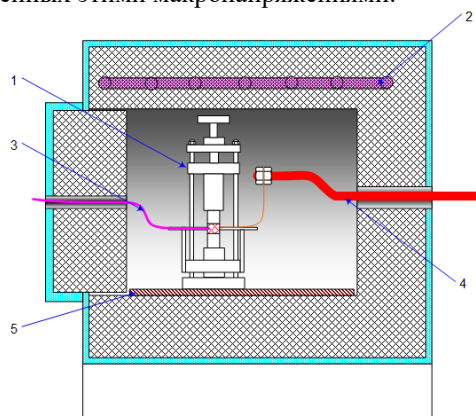


Рисунок 2. Внешний вид образцов прототипных кориумов (ПК) быстрого энергетического реактора

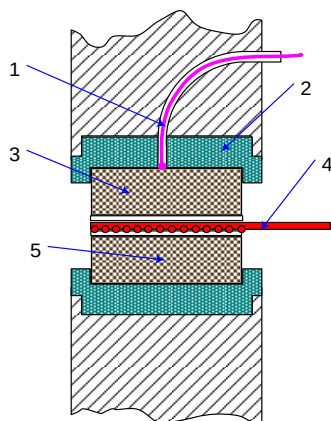
При выполнении измерений ТФС на этих образцах в установке УТФИ-2 при комнатной температуре, как правило, не наблюдалось какого-либо влияния структуры образцов на получаемые результаты. Наоборот, при выполнении температурных измерений ТФС практически у всех образцов наблюдалось (в большей или меньшей степени) влияние на получаемые результаты особенностей структурно-фазового состояния образцов. Этот материал у всех одиннадцати образцов содержит в своей основе переплавленную керамику из диоксида урана, а также небольшое количество стали в виде точечных включений или прослоек по границам зерен керамической матрицы. Такой материал обладает характерной для хрупкого керамического материала дефектной структурой, обусловленной неотъемлемым присутствием в ней раковин, трещин, пор, несплошностей, межзеренных прослоек, включений, тройных стыков зерен, микро- и субмикротрещин, локальных колебаний элементного состава, размера зерна и пористости от участка к участку, различий в элементном составе внутренних и периферийных областей зерен и др. Разнообразие видов дефектов обеспечивает присутствие в подобном материале [11–14] как макронапряжений, так и различных микронапряжений, локализованных на трещинах и порах, на межфазных границах, на участках отдельных групп зерен, на участках отдельных зерен, в устье микронадрыва, микро- и субмикротрещин (дефекта Гриффитса).

Сказанное означает, что материал кориумов находится в неравновесном состоянии и способен относительно легко переходить в более равновесное состояние через релаксацию макро- и микронапряжений путем локальных макро- и микроразрушений под действием даже небольшой внешней нагрузки. Такой нагрузкой может быть обычный нагрев, создающий, например, локальные напряжения на межфазных границах за счет различий в коэффициентах линейного расширения у этих фаз, или нагрев с градиентом температуры, создающий, во-первых, термические микронапряжения, а во-вторых, микронапряжения на каждом из структурных дефектов, нагруженных этими микронапряжениями.



1 – кондуктиметр; 2 – нагреватель; 3 – термопары;
4 – токоподводы; 5 – подовая пластина

Рисунок 3. Схема размещения кондуктиметра установки УТФИ-2 в нагревательной печи



1 – термопара; 2 – теплоизоляция; 3 – исследуемый образец;
4 – нагревательный элемент; 5 – вспомогательный образец

Рисунок 4. Схема размещения образцов в кондуктиметре установки

Именно в таких условиях температурного воздействия будет находиться материал образцов кориума в процессе измерений у них теплофизических свойств в установке УТФИ-2. Действительно, по ходу измерений исследуемый образец вместе с кондуктиметром (и вспомогательным образцом) подвергается ступенчатому нагреву (и остыванию) в нагрева-

тельной печи установки (рисунок 3), что вызывает появление в материале исследуемого образца как минимум межфазных микронапряжений. При этом после каждой выдержки кондуктиметра с образцами на достигнутой температурной ступени через нагревательный элемент кондуктиметра (см. позицию 4 на рис. 4), пропускается импульс тока, создающий скачок температуры на торцевой поверхности дискового образца. Неоднородное распределение температуры вызывает в исследуемом образце термоупругие микронапряжения со сжатием на внутреннем (более горячем) участке поверхности торца и растяжением на периферийном (менее горячей) ее участке. Циклический характер этих термонапряжений может приводить к развитию системы микро- и макротрещин в керамической матрице образца и соответствующим изменениям его ТФС.

Влияния термоциклического воздействия на ТФС кориума

У всех изготовленных образцов натурального и прототипного кориумов на установке УТФИ-2 были выполнены измерения температуропроводности, удельной теплоемкости и теплопроводности. Результаты этих измерений для каждого из одиннадцати образцов в соответствующих протоколах были представлены в виде температурных зависимостей $\alpha = \alpha(T)$, $c_p = c_p(T)$ и $\lambda = \lambda(T)$, полученных в одном, в двух или даже в трех циклах измерений, где под температурным циклом измерений понималось измерение вначале при ступенчатом (через каждые примерно 50°C) подъеме температуры образца, а затем при ступенчатом (через каждые примерно 100°C) снижении его температуры.

При этом за результат измерений теплофизических свойств принимались данные, полученные на этапе ступенчатого подъема температуры образца при первом цикле его нагрева и остывания (при первом термоцикле «нагрев-остывание»). Что же касается результатов измерений теплофизических свойств, получаемых на этапе ступенчатого снижения температуры образца при первом цикле «нагрев-остывание», а также на этапах нагрева или остывания при втором или третьем термоциклах «нагрев-остывание», то они использовались как раз для выяснения степени влияния термоциклического воздействия на структуру исследуемых кориумов (имеется в виду, что любые отклонения температурных зависимостей $\alpha = \alpha(T)$, $c_p = c_p(T)$ и $\lambda = \lambda(T)$, полученных на этапе ступенчатого нагрева образца при первом термоцикле, от подобных зависимостей на этапе ступенчатого остывания при первом термоцикле или же на этапах ступенчатых нагревов или остываний при втором или третьем термоциклах, будут указывать на структурные изменения, происходящие под влиянием термоциклических воздействий).

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОРИУМА БЫСТРОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА

Таблица 1. Устойчивость структуры образцов натурального кориума при термоциклировании

Образец	НК-1	НК-2	НК-3	НК-4	НК-5
Уровень устойчивости структуры под термоциклическим воздействием	полностью устойчивое состояние	полностью неустойчивое состояние	относительно устойчивое состояние	устойчивое состояние	устойчивое состояние

Таблица 2. Устойчивость структуры образцов прототипного кориума при термоциклировании

Образец	ПК-1	ПК-2	ПК-3	ПК-4	ПК-5	ПК-6
Уровень устойчивости структуры под термоциклическим воздействием	неустойчивое состояние	полностью неустойчивое состояние	неустойчивое состояние	относительно устойчивое состояние	устойчивое состояние	полностью неустойчивое состояние

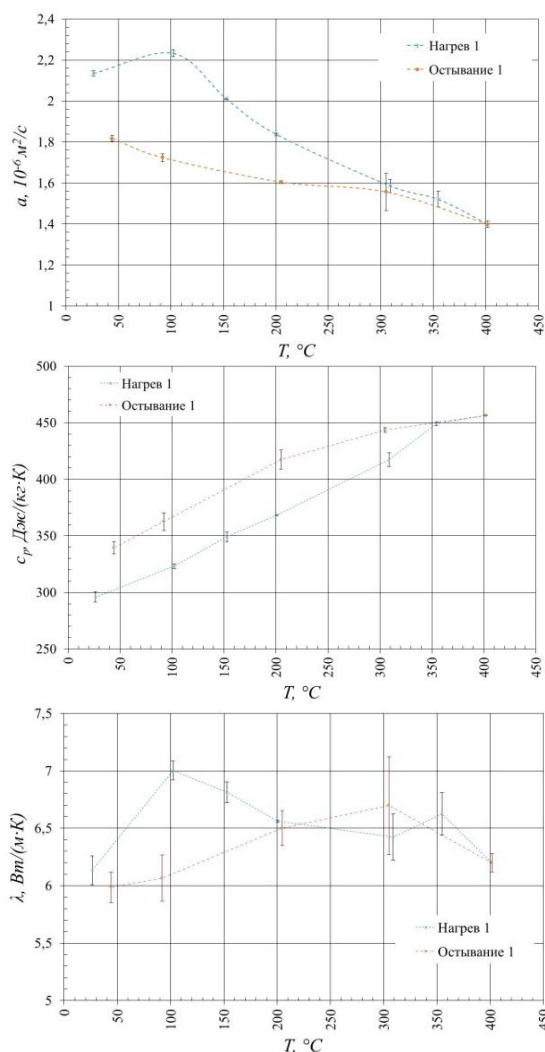


Рисунок 5. Температурные зависимости ТФС образца НК-2 в первом термоцикле «нагрев-остывание»

Анализ результатов измерений теплофизических свойств натурального и прототипных кориумов, представленных в протоколах, выявил следующее. Уровни устойчивости структуры под термоциклическим воздействием у различных образцов кориумов сильно различаются (см. таблицы 1 и 2). У образцов и натурального, и прототипных кориумов этот уровень меняется от полностью неустойчивого состояния,

когда уже в первом термоцикле имеют место сильные отклонения (гистерезис) температурных зависимостей ТФС при нагреве и остывании (см., например, рисунок 5), до полностью устойчивого (см., например, рисунок 6), когда температурные зависимости практически повторяют друг друга в процессе двух или даже трех термоциклов.

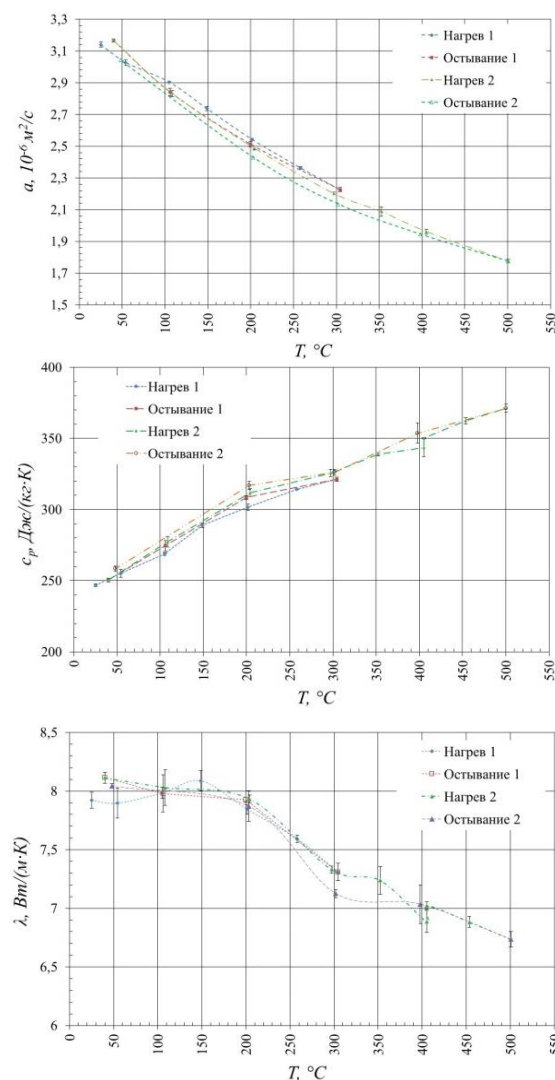


Рисунок 6. Температурные зависимости ТФС образца НК-1 в первом и втором термоциклах «нагрев-остывание»

Как можно видеть из таблиц 1 и 2, в двух образцах зафиксировано неустойчивое состояние структуры и еще в трех – полностью неустойчивое состояние; в остальных шести образцах обнаружен вполне приемлемый уровень устойчивости структуры: в одном зафиксировано полностью устойчивое состояние структуры, в трех – устойчивое, а еще в двух – относительно устойчивое состояние.

Таким образом, из результатов проведенного анализа следует, что термоциклические воздействия на образцы натурного и прототипных кориумов могут как вызывать, так и не вызывать изменений их макро- и микроструктуры, способных изменять ТФС этих кориумов (другими словами, термоциклические воздействия на образцы натурного и прототипных кориумов не создают закономерных изменений их теплофизических свойств).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Осуществлен анализ результатов измерений температурных (до примерно 400 °C) зависимостей теп-

лофизических свойств (температуропроводности a , удельной теплоемкости c_p и теплопроводности λ) натурного и прототипного кориумов энергетического реактора на быстрых нейтронах. С целью выяснения закономерностей влияния термоциклирования на изменение теплофизических свойств кориума были проанализированы отклонения температурных зависимостей $a = a(T)$, $c_p = c_p(T)$ и $\lambda = \lambda(T)$, полученных на этапе нагрева образца при первом цикле измерений, от подобных зависимостей, полученных на этапе остывания образца при первом цикле и на этапах его нагревов или остываний при втором или третьем циклах. На основании анализа результатов исследований пяти дисковых образцов натурного кориума и шести дисковых образцов прототипных кориумов сделан вывод об отсутствии какого-либо закономерного влияния термоциклического воздействия на изменение микроструктуры, а следовательно, и на изменение теплофизических свойств реакторных кориумов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Свинухов Д.С., Жданов В.С., Бакланов В.В., Саблук В.В. Методика определения теплофизических свойств образцов перспективного топлива для ВВЭР. Вестник НЯЦ РК, вып. 2, 2009, с. 86–92.
2. M. Skakov, N. Mukhamedov, I. Deryavko, et al. Study of thermophysical properties of light-water reactor corium. – Reports of Inter. conf. on electrical and electronics «Techniques and Applications (EETA)», 2015, August 23–24, Phuket, Thailand, 2015, p. 75–80.
3. M. Skakov, N. Mukhamedov, I. Deryavko, et al. Temperature dependence of thermophysical properties of light-water reactor prototype corium. – Reports of Inter. conf. «Materials and Engineering and Industrial Applications (MEIA)», 2015, September 20–21, Hong Kong, p. 75–79.
4. Скаков М.К., Мухамедов Н.Е., Дерявко И.И. и др. Исследование теплофизических свойств кориума легководного реактора с различной степенью окисленности циркония. – Материалы X Междунар. конф. «Ядерная и радиационная физика», 8–11 сент. 2015 г., Курчатов, НЯЦ РК, 2016, с. 149–154.
5. M. Skakov, N. Mukhamedov, W. Wieleba, and I. Deryavko. Study of corium thermophysical properties of light water reactor with different oxidation degrees of zirconium. – Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences, vol. 7(4), 2016, p. 2018–2024.
6. M. Skakov, N. Mukhamedov, A. Vurim, et al. Thermo-physical properties and phase composition of full-scale corium of fast energy reactor. – International Journal of ChemTech Research, 2016, vol. 9, No. 12, p. 725–730.
7. Skakov M.K., Mukhamedov N.E., Deryavko I.I., Kukushkin I.M. Thermal properties and phase composition of full-scale corium of fast energy reactor. – Key Engineering Materials, 2017, vol. 736, p. 58–62.
8. M.K. Skakov, N.Ye. Mukhamedov, A.D. Vurim, I.I. Deryavko. Temperature dependence of thermophysical properties of full-scale corium of fast energy reactor. – Science and Technology of Nuclear Installations, Volume 2017, Article ID 8294653, 7 pages.
9. Скаков М.К., Дерявко И.И., Мухамедов Н.Е. и др. Температурные зависимости теплофизических свойств натурного и прототипного кориумов быстрого энергетического реактора. – Вестник НЯЦ РК, вып. 1, 2017, с. 69–74.
10. N. Mukhamedov, M. Skakov, I. Deryavko, I. Kukushkin. Thermal properties of prototype corium of fast reactor. – Nuclear Engineering and Design, vol. 322, 2017, p. 27–31.
11. Дерявко И.И., Ланин А.Г., Таубин М.Л. Методика рентгендифрактометрической оценки уровней локальных напряжений в крупнозернистых спеченных материалах. – Порошковая металлургия, 1978, №2, с. 67–71.
12. Дерявко И.И., Ланин А.Г., Маскаев А.С. Рентгенографическое изучение временных микронапряжений в спеченных карбидах. – Порошковая металлургия, 1984, №10, с. 84–86.
13. Ланин А.Г., Дерявко И.И. Напряжения в спеченных тугоплавких соединениях. – Труды II Всесоюз. симп. «Остаточные технологические напряжения», М., ИПМ АН СССР, 1985, с. 125–130.
14. Ланин А.Г., Дерявко И.И. Остаточные напряжения и прочность керамических материалов. – Тезисы V Междунар. конф. «Фазовые превращения и прочность кристаллов, Черногловка, 17–21 ноября 2008 г.», Черногловка, ИФТТ РАН, 2008, с. 31.

**ЖЫЛДАМ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ РЕАКТОР КОРИУМДАРЫНЫҢ ЖЫЛУФИЗИКАЛЫҚ
ҚАСИЕТТЕРІНЕ ТЕРМОЦИКЛДЕУДІҢ ӘСЕРІ**

¹⁾ М.К. Скаков, ¹⁾ И.И. Дерявко, ²⁾ Н.Е. Мухамедов, ¹⁾ И.М. Кукушкин

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

²⁾ Семей қаласының Шәкәрім атындағы Мемлекеттік университеті, Семей, Қазақстан

Жылдам реактордың натурлы және прототипті кориумдарының жылуфизикалық қасиеттерінің (температураөткізгіштік a , меншікті жылуықымдылық c_p және жылуөткізгіштік λ) температуралық тәуелділігін зерттеу нәтижелері қарастырылған. УТФИ-2 қондырғысында кориумның дисклі үлгілерінің жылуфизикалық қасиеттерін жылулық шашырату әдісімен зерттеу ерекшеліктері көрсетілген. Бөлме температурасы мен 400 °C температура аралығында кориум үлгілерінің жылуфизикалық қасиеттеріне термоциклдеу әсерінің белгілі бір заңдылығы анықталған жоқ.

**THERMAL CYCLING INFLUENCE ON PROPERTIES THERMOPHYSICAL
CORIUM OF FAST ENERGY REACTOR**

¹⁾ M.K. Skakov, ¹⁾ I.I. Deryavko, ²⁾ N.Ye. Mukhamedov, ¹⁾ I.M. Kukushkin

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

²⁾ Shakarim State University of Semey, Semey, Kazakhstan

The analysis of the results of measurements of thermophysical properties (thermal diffusivity a , specific heat capacity c_p , and thermal conductivity λ) for two batches of samples of full-length and prototypical coriums of a fast energy reactor was performed. Features of measurements of thermophysical properties (TFS) by the method of thermal flare on disk samples of the coriums in the UTFI-2 installation are considered. The absence of a regular effect of the thermocyclic action appearing in the samples of the coriums during the TFS measurements on the results of studies of the temperature dependences of the thermophysical properties of the coriums in the temperature range from room temperature to about 400 °C has been revealed.

УДК 669.295'71; 539.231; 539.25'26

МЕХАНИЧЕСКОЕ СПЛАВЛЕНИЕ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ Ti-Al НА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА VT1-0

^{1,2)} Сагдолдина Ж.Б., ¹⁾ Скаков М.К., ³⁾ Виелеба В.¹⁾ Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ, Курчатов, Казахстан
²⁾ Государственный университет им. Шакарима города Семей, Семей, Казахстан
³⁾ Вроцлавский технологический университет, Вроцлав, Польша

В данной статье приведены результаты исследования формирования Ti-Al покрытий на поверхности титана методом механического сплавления. Показано, что в процессе формирования покрытий частицы титана обволакиваются пластичными составляющими смеси алюминием, и выстраивается в композицию покрытий. Под действием ударов шаров внутренняя структура компонентов покрытий эффективно вымешивается, в результате формируется плотное и прочное покрытие. Исследование границы подложка-покрытие показало практическое отсутствие следов диффузии покрытий в подложку. Показано, что при отжиге покрытий в интервале температур 600-900 °С за счет ускорения процессов диффузии были образованы интерметаллидные соединения системы Ti-Al. Для ускорения процесса образования интерметаллидов Ti-Al в процессе МС на поверхности подложки нужно использовать термический отжиг в качестве комплексной обработки поверхности образца. Результаты сравнительной оценки адгезионной прочности показали, что значительное улучшение наблюдается после отжига 900 °С. Улучшение адгезии после отжига может быть связано с диффузионными процессами, которые могут облегчать структурную релаксацию после процесса деформационного перемешивания.

ВВЕДЕНИЕ

Метод МС находит широкое применение для получения покрытий на поверхности металлов и сплавов. К преимуществам метода МС можно отнести отсутствие ограничений при выборе материалов покрытия и подложки. Методом МС можно получить металлическое, керамическое, композиционное покрытие, состоящее из оксидов, нитридов, карбидов или силицидов [1]. Одна из первой попытки применения метода МС для нанесения металлических покрытий было сделано в работе [2]. Значимые исследования по применению метода МС для получения защитных покрытий на поверхности металлов и сплавов проводятся в работах [3–5].

В настоящее время отсутствует единая теория, позволяющая определять условия нанесения покрытий методом МС. В работе [6] описаны три основных механизмов МС в зависимости от физических свойств металлов: «пластичное-пластичное»; «пластичное-хрупкое»; «хрупкое-хрупкое». Согласно механизму «пластичное-пластичное» при механической обработке пластичных металлов происходит расплющивание частиц, и образуется многослойное покрытие из сплавляемых металлов, с чередованием слоев. Пластическая деформация таких слоистых образований приводит к эффектуковки, из-за чего увеличивается хрупкость твердого вещества, в конечном итоге покрытие разрушается, измельчается. В результате дальнейшей механической обработки образуются твердые растворы, интерметаллиды и аморфные фазы, в которых смешивание достигало атомарного уровня. По механизму «пластичное-хрупкое» при совместной механической обработке частицы хрупкого компонента будут окружены слоями пластичного компонента. При дальнейшей ме-

ханической обработке происходит разрушение образованных слоев пластичного компонента с «пойманными» частицами хрупкого, и будет происходить гомогенизация композита, приводящая к образованию твердого раствора. Третий механизм МС рассматривает взаимодействия вида «хрупкое-хрупкое», и если сравнивать с описанными выше механизмами, в которых участвуют пластичные компоненты, при реакции между двумя хрупкими твердыми веществами лимитирующим фактором процесса является образование контакта реагентов. Предполагается, что осуществление реакции происходит за счет неравнозначного измельчения компонентов – более хрупкий материал имеет меньший предел измельчения, в то время как менее хрупкий материал останется в виде более крупных частиц. Таким образом, более крупные частицы одного компонента будут окружены более измельченными частицами другого компонента – по аналогии с механизмом «хрупкое-пластичное». Но при этом, естественно, диффузионные расстояния значительно больше, чем в случае пластичных реагентов, что зачастую затрудняет процесс МС при низких температурах.

Система Ti-Al, если рассмотреть механизм формирования покрытий в зависимости от физических свойств сплавляемых компонентов, относится к системе «пластичное-пластичное», и обладает наиболее оптимальным сочетанием компонентов для МС. Композиционный состав наносимой смеси, а также ее природа (хрупкость и пластичность), фазовый состав конечного продукта МС (твердый раствор, интерметаллическое соединение или аморфная фаза) [7].

Целью настоящей работы являлась изучение особенностей формирования Ti-Al покрытий на поверхности титана VT1-0, полученных методом МС.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Методом МС на поверхность титана было нанесено Ti-Al покрытие на вибрационной установке СВУ-2 (Стенд вибрационный универсальный), рисунок 1а. В процессе МС формирование покрытий зависит от эффективности контакта шаров с поверхностью обрабатываемого материала и частицами порошка. В данной работе подложка из титана крепилась сверху вибрационной камеры для повышения эффективности процесса нанесения покрытий. Схематическое изображение процесса нанесения покрытий методом МС показано на рисунке 1б.

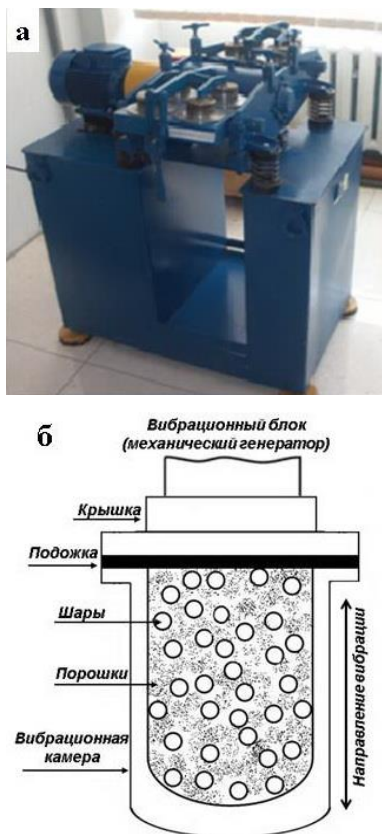


Рисунок 1. Метод МС: а) вибрационная установка СВУ-2; б) схематическое изображение метода МС

В качестве подложки была использована пластина из технического чистого титана VT1-0 размером 70×70×3 мм. Перед нанесением покрытий поверхность подложки была отшлифована. Для нанесения покрытий были использованы порошки Ti (чистота 99 %, размер фракций 45 мкм) и Al (чистота 99 %, размер фракций 5 мкм). Была проведена предварительная механоактивация смеси порошка в массовых долях Ti – 37 % и Al – 63 %. Параметры процесса механической обработки порошка: частота колебаний 50 Гц, амплитуда 3,5 мм, время нанесения покрытий 1 ч, диаметр шаров 6 мм, отношение массы порошка к массе шаров $m_{п.}:m_{ш.}=1:50$.

Параметры процесса МС для нанесения покрытий: частота колебаний 50 Гц, амплитуда 3,5 мм,

степень заполнения камеры 80 %, время нанесения покрытий 1 ч, диаметр шаров 4 мм, масса шара 300 г, отношение массы порошка к массе шаров 1:50.

В данной работе рассмотрено влияние термического отжига на фазовый состав Ti-Al покрытий, полученных методом МС на поверхности титана VT1-0. Был проведен вакуумный отжиг (вакуум 10^{-3} Па) полученных образцов при температурах 600 °С, 700 °С и 900 °С в течение времени 2 часа с последующим охлаждением в печи. Методом нанесения царапины при изменяющейся во времени нагрузке от 0,01 Н до 10 Н была исследована адгезионная прочность Ti-Al покрытий на поверхности титана до и после отжига на приборе Micro Scratch Tester.

Фазовый состав исследуемых образцов определялся методом рентгенфазного анализа на дифрактометре Bruker D8 Advance. Рентгенографический анализ фазового состава проведен с использованием базы данных PDF2. Морфология, структура и элементный состав поверхности покрытий были исследованы на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390 (JEOL) с детектором энергодисперсионной спектроскопии (EDS), на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) JEOL JEM2100. Элементный состав покрытий был исследован на Оже электронном спектрометре «Шхуна-2».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методом МС на поверхности титана было получено Ti-Al покрытие толщиной 75 мкм, рисунок 2б.

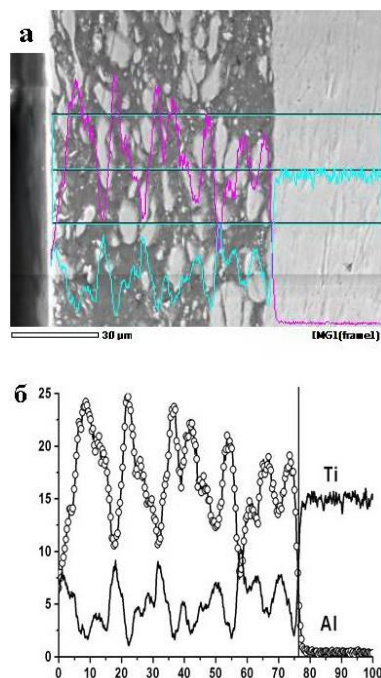


Рисунок 2. Ti-Al покрытие на поверхности титана: а) поперечное сечение; б) распределение элементов по поперечному сечению образца

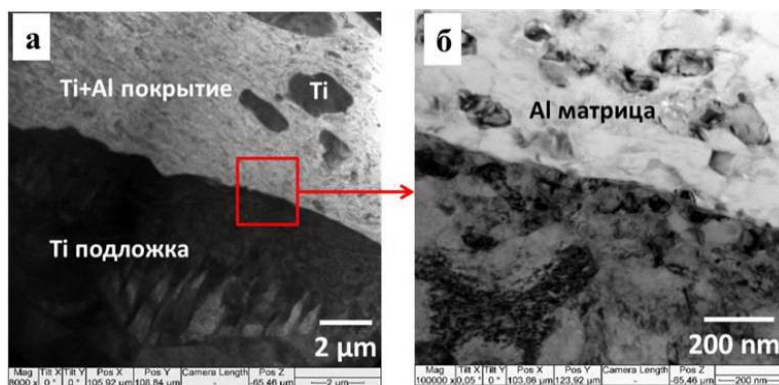


Рисунок 3. ПЭМ изображение формирования покрытий: а) граница раздела подложка/покрытие; б) переходный слой подложка/покрытие

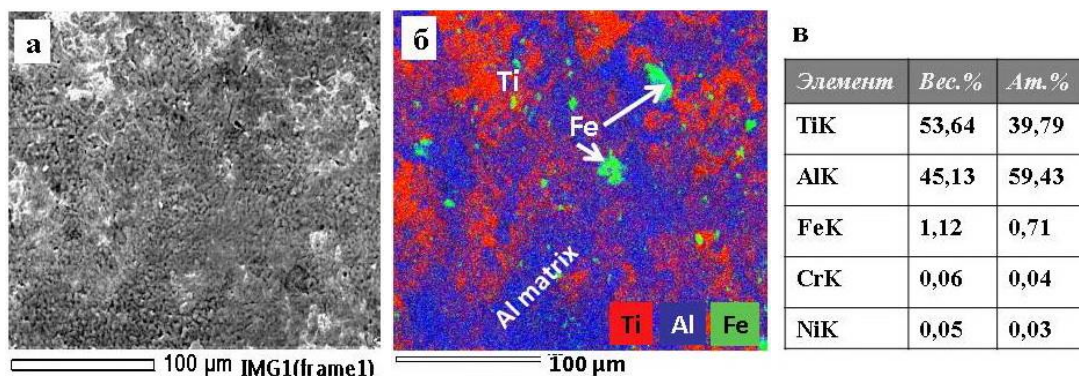


Рисунок 4. Морфология поверхности образца (а) и цветное изображение ЭДС картирования (б) с результатом ЭДС анализа (в)

Структура Ti-Al покрытий состоит из частиц Ti в матрице Al. Вероятно, под воздействием ударов шаров частицы мягких элементов, в нашем случае Al, закрепляются на подложке. Частицы более твердых элементов, Ti, вбиваются в пластичную матрицу, и образуется плотное Ti-Al покрытие, рисунок 2а. Более детальное исследование формирования покрытий было проведено на ПЭМ, рисунок 3.

Исследование границы подложка-покрытие показало практическое отсутствие следов диффузии покрытий в подложку из титана (рисунок 3б). При процессе МС под воздействием ударов шаров контакт между частицами наносимой смеси порошка и матрицей обеспечивается за счет локальных давлений и пластического течения материала границы подложка/покрытие. Чем пластичнее частицы свариваемого металла, тем устойчивее будет соединение их путем холодной сварки [8].

Многократное повторение процессов деформации приводит к возникновению слоистой структуры. Частицы титана распределяются внутри слоев, обволакиваются пластичными составляющими смеси алюминия и выстраиваются в композицию, рисунок 3а. Известно, что при обработке методом МС процессы сплавления и измельчения идут параллельно и конкурируют между собой, в результате чего внутренняя структура компонентов покрытий

эффективно вымешивается и возникает гомогенное покрытие.

На рисунке 4а показана морфология поверхности образца, которая состоит из матрицы конгломератов и не сваренных компонентов порошка. Согласно данным элементного анализа, поверхность образца состоит из матрицы Al и не перемещенного Ti (рисунок 4б). Светлые участки поверхности образца соответствуют максимальным содержаниям титана (рисунок 4а). Можно предположить, что светлые участки образуются на месте удара шаров с минимальным напряжением, где не происходит перемешивание компонентов покрытий, т.е. внедрение частицы Ti в матрицу покрытий. Результаты элементного анализа показывают не большое загрязнение поверхности покрытий железом (рисунок 4в).

Несмотря на значительные достоинства метода МС, основным его недостатком является загрязнение обрабатываемого материала продуктами износа мелющих тел и вибрационной камеры. В работе [9] исследовалось загрязнение железом порошков чистых элементов при механоактивации. Было обнаружено, что в обработанных образцах примесное железо может растворяться в решетке обрабатываемого элемента или образовывать с ними интерметаллические соединения, в зависимости от характера взаимодействия железа с конкретным элементом. Как

известно, степень загрязнения при МС зависит от интенсивности энергии ударов шаров. Определяющим параметром интенсивности энергии ударов шаров является отношение массы порошка и шаров ($m_n:m_{ш}$). Этот параметр влияет на процесс МС двояким образом. С одной стороны, уменьшение $m_n:m_{ш}$ приводит к росту степени загрязнения порошка материалом мелющих тел. С другой стороны при увеличении $m_n:m_{ш}$ прекращаются самораспространяющиеся реакции, индуцированные механическим воздействием за счет роста теплоотода через шары [10]. В нашем эксперименте $m_n:m_{ш}$ составляло 1:50. Это отношение является оптимальной для нанесения покрытий на установке СВУ2.

На рисунке 5 показаны результаты исследования методом послойной электронной оже-спектроскопии. Элементы регистрировались, перемещая электронный пучок с поверхности до дна по стенке вышлифованного кратера (рисунок 5б), потом, в соответствии с профилем, определялась глубина. Для достоверности результатов на каждой глубине были зарегистрированы по 4 спектра.

Из оже-спектра видно (рисунок 5в), что компоненты покрытия (Ti, Al) равномерно распределены по толщине покрытий. На рисунке 5а показан концентрационный профиль покрытий. По данным оже-спектроскопии концентрация обнаруженных элементов остается постоянным. Однако содержание алюминия в покрытии находится на уровне 3,5 ат. %. Необходимо отметить, что относительная погрешность определения концентраций методом послойной электронной оже-спектроскопии имеет высокое значение [11]. На оже-спектрах приповерхностных слоев наблюдается повышенное содержание

углерода и кислорода. В данной работе подложка из титана крепилась сверху вибрационной камеры для повышения эффективности процесса нанесения покрытий. Однако камера была не герметизирована, окружающая атмосфера проникала в контейнер во время нанесения покрытий. Контроль образования углерода является особенно важным для обеспечения необходимой усадки при спекании порошков для получения сплавов, а другие примеси существенно ограничивают усадки при спекании порошков. Углерод имеет тенденцию реагировать с переходным металлом Ti с образованием очень тонкой дисперсии карбидов. Ожидается, что эти мелкие дисперсии будут ограничивать рост зерна во время последующего процесса отжига или процесса во время консолидации порошка и может быть полезен для упрочнения сплава [12]. Загрязнение железом наблюдается на средних слоях покрытий. В работе [13] максимальное содержание железа в покрытии, обнаружена на границе раздела покрытие/подложка, и уменьшалось по направлению к поверхности покрытия. Причину низкого содержания железа авторы объяснили тем, что на начальных этапах МС шары и внутренняя поверхность стенок камеры покрываются Ti-Al слоем, который препятствует проникновению железа в покрытие. Здесь стоит отметить, что в указанной работе обрабатываемый материал (подложка из титана) был расположен внутри камеры, где на начальных этапах вероятность загрязнения больше за счет того что, под действием вибрации он постоянно перемещается и занимает различные положения в рабочей среде и зонах рабочей камеры.

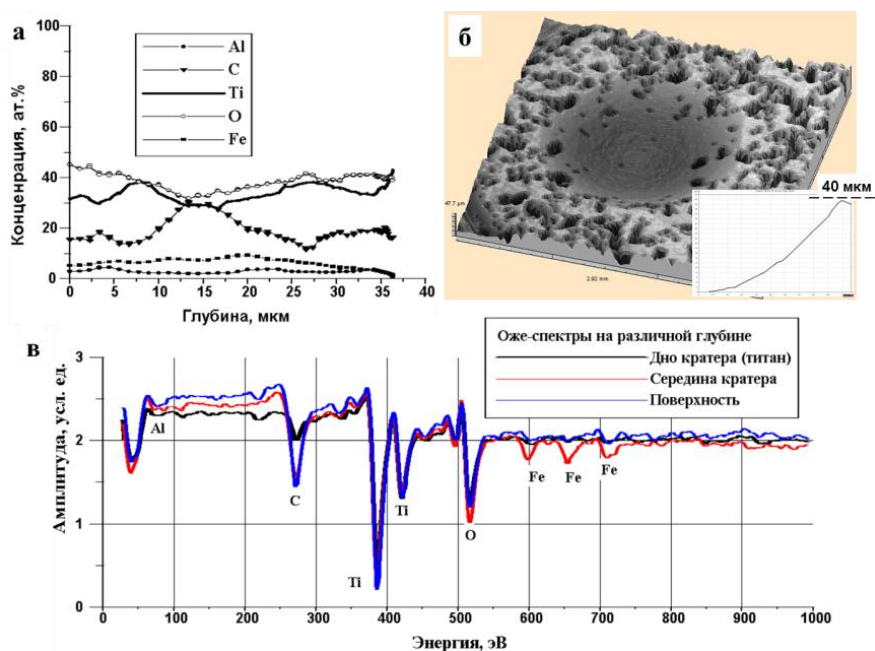


Рисунок 5. Результаты Оже спектроскопии: а) распределение элементов по толщине покрытий; б) кратер с изображением профиля; в) оже-спектр на разной глубине кратера

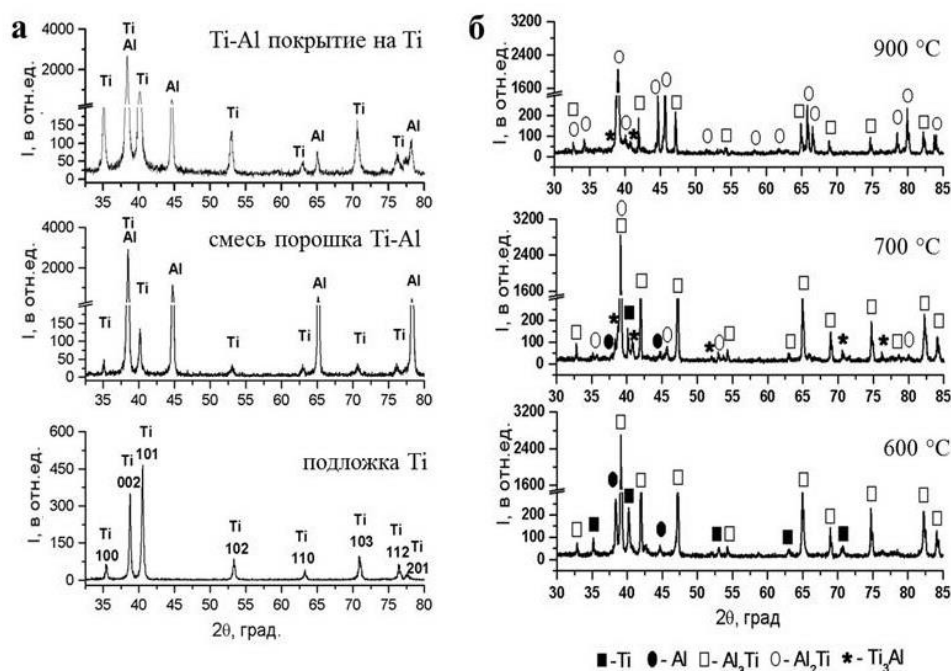


Рисунок 6. Дифрактограммы исходных материалов и Ti-Al покрытий: а) до отжига; б) после отжига при разных температурах

В данном эксперименте обрабатываемый листовый материал крепился сверху вибрационной камеры, и возможно на начальных этапах процесс самофутеровки благоприятствует снижению уровня загрязнения, а на следующих этапах за счет пластической деформации покрытие, которое состоит из множества расплюснутых частиц сплавляемых металлов на поверхности шаров, приобретает хрупкость и разрушается, покидая поверхность рабочего тела. Исходя из этого, на приповерхностных слоях покрытий, в случае закрепления образца сверху камеры, вероятность загрязнения железом наоборот увеличивается.

Результаты рентгенофазного анализа показали, что получаемое покрытие состоит из неореагировавших частиц Ti-Al, т.е. не наблюдаются образования новых соединений и следов загрязнений на уровне разрешающей способности метода рентгенофазного анализа, рисунок 6а.

Было обнаружено снижение интенсивности дифракционных линий Al и уширение линий Ti. Однако этот факт недостаточно для подтверждения растворения Al в Ti, из-за ограниченной разрешающей способности метода рентгенофазного анализа. Различные изменения дифракционных линий образца после МС свидетельствуют о наличии дефектных структурных состояний. Эти состояния являются источниками высоких локальных внутренних напряжений, и играют существенную роль в явлении увеличения реакционной способности компонентов обрабатываемых материалов, аномально высокого массопереноса и твердофазного механического

сплавления. Стоит отметить, что для образования новых соединений в системе Al и Ti, требуется более длительное время механообработки. Учитывая невозможность сравнения результатов, полученных на различных механоактиваторах и при разных параметрах процесса МС, можно сказать, что для образования интерметаллидных соединений Ti-Al методом МС продолжительность времени процесса механообработки порошков составляет больше 10 часов. В настоящее время изучаются вопросы образования интерметаллидов Ti-Al в процессе МС на поверхности подложки. В работах С.Е. Романькова и др. приводятся экспериментальные результаты по получению Ti-Al покрытий методом МС и формирование интерметаллидных соединений в исследуемой системе после термической обработки [14]. При термическом отжиге происходят фазовые превращения диффузионного характера с образованием интерметаллидных соединений Ti-Al.

На рисунке 6б приведены дифрактограммы образцов после термической обработки. Данные рентгенофазного анализа приповерхностных слоев образцов после термического отжига позволили установить присутствие следующих фаз: Al (PDF №4-787), TiAl (PDF №5-678), Ti₃Al (PDF №9-98), Al₂Ti (PDF №47-1177) и Al₃Ti (PDF №37-1449). После отжига 600 °C реакция взаимодействия между Ti и Al приводит к образованию соединений Al₃Ti в соответствии с равновесной диаграммой состояния Ti-Al [15], а также присутствуют линии непрореагировавшие алюминия и титана (рисунок 2а).

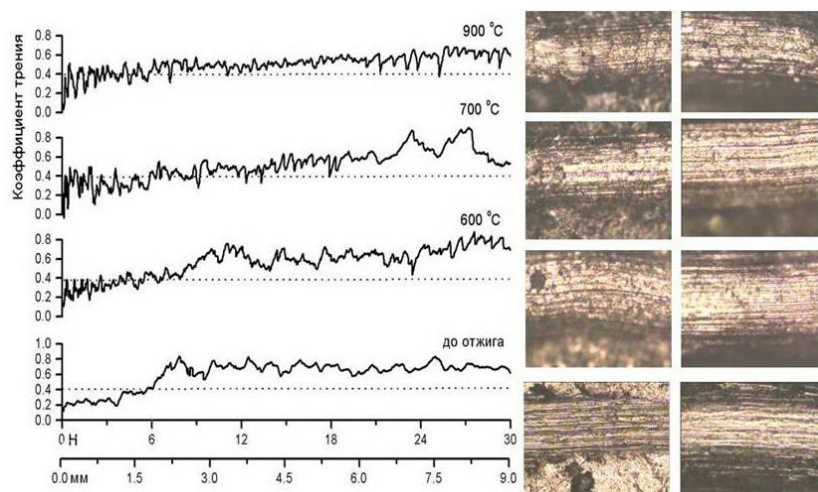


Рисунок 7. Оценка адгезионной прочности Ti-Al покрытий на поверхности титановой подложки до и после отжига при разных температурах

Результаты исследования эволюции фазового превращения алюминидов титана, приведенные в работе [16] показали, что при низкой температуре, сначала образуется Al_3Ti -фаза в результате взаимодействий Ti и Al, из-за минимальной свободной энергии образования среди других интерметаллидов системы титан-алюминий. После отжига 700 °C в результате взаимодействия Al_3Ti с Ti образуются Al_2Ti и Ti_3Al , и наблюдается уменьшение объемной доли Ti и Al. Отжиг Ti-Al покрытий при 900 °C приводит к уменьшению объемной доли линии соединения Al_3Ti и усилению интенсивности дифракционных отражений Al_2Ti . Отсутствие алюминия и титана в конечном продукте показывает полное растворение Al в Ti с образованием новых интерметаллических соединений, которые являются основой продукта взаимодействия в исследуемой системе.

Была исследована адгезионная прочность Ti-Al покрытий на поверхности титана до и после отжига методом скратч-тестирования, рисунок 7. В результате испытаний определялась минимальная нагрузка, которая приводила к разрушению покрытия.

При скрайбировании Ti-Al покрытий до отжига при нагрузке 6 Н происходит отрыв покрытия от поверхности подложки. Результаты сравнительной оценки адгезионной прочности показали, что значительное улучшение наблюдается после отжига 900 °C, так как резкий отрыв покрытий от подложки не наблюдается. Улучшение адгезии после отжига может быть связано с диффузионными процессами, которые могут облегчать структурную релаксацию после процесса деформационного перемешивания.

ВЫВОДЫ

Анализируя полученные в работе экспериментальные результаты, можно сделать следующие выводы:

- установлено, что в начальной стадии формирования покрытий происходит процесс конгломерации частицы порошков Ti и Al, частицы мягкого

элемента, в нашем случае Al, обволакивают частицы Ti, образуя пластичную матрицу на поверхности подложки. Под действием ударов частицы Ti вбиваются в пластичную матрицу, в результате формируется покрытие. Исследование границы подложка-покрытие показало практическое отсутствие следов диффузии покрытий в подложку из титана;

- показано, что при отжиге покрытий в интервале температур 600–900 °C были образованы интерметаллидные соединения системы Ti-Al. Для ускорения процесса образования интерметаллидов Ti-Al в процессе МС на поверхности подложки нужно использовать термический отжиг в качестве комплексной обработки поверхности образца;

- обнаружено поверхностное загрязнение покрытий углеродом и кислородом, за счет не герметичности камеры, окружающая атмосфера проникала внутрь камеры. Однако образование карбидных и оксидных фаз методом рентгенофазного анализа не обнаружено. Загрязнение железом наблюдается на средних слоях покрытий;

- выявлено, что относительная концентрация компонентов покрытий практически постоянна в основной части покрытий и изменяется лишь близи поверхности и на границе раздела покрытие/подложка, что свидетельствует об однородности покрытий;

- изучена адгезионная прочность покрытий до и после отжига. Результаты сравнительной оценки адгезионной прочности показали, что значительное улучшение наблюдается после отжига 900 °C. Улучшение адгезии после отжига может быть связано с диффузионными процессами, которые могут облегчать структурную релаксацию после процесса деформационного перемешивания.

Работа была выполнена в рамках грантового финансирования научных исследований на 2015-2017 годы Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан, грант 2063/ГФ4.

ЛИТЕРАТУРА

1. High-Energy Ball Milling. Mechanochemical Processing of Nanopowders / Ed. M. Sopička-Lizer. - Cambridge: CRC Press. - 2010. - 422 p.
2. Torosyan, A. R. A New Mechanochemical Method for Metal Coating / R.T. Jonathan, A.M. Korsunsky, S.A. Barseghyan // Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials. - 2002. - V. 13. - P. 251-256.
3. Romankov, S. Fabrication of nanostructure Mo coatings on Al and Ti substrates by ball impact cladding / S. Romankov, Y. Hayasaka, E. Kasai, J.-M. Yoon // Surface and Coatings Technology. - 2010. - V. 205. - P. 2313-2321.
4. Zadorozhnyy, V. Formation of intermetallic Ni-Al coatings by mechanical alloying on the different hardness substrates / V. Zadorozhnyy, S. Kaloshkin, V. Tcherdyntsev, M. Gorshenkov, A. Komissarov, M. Zadorozhnyy // Journal of Alloys and Compounds. - 2014. - 586. - P. 373-376.
5. Li, Y. Microstructure evolution of Cr coatings on Cu substrates prepared by mechanical alloying method / Y. Li, C. Chen, R. Deng, X. Feng, Y. Shen // Powder Technology. - 2014. - 268. - P. 165-172.
6. Murty, B. S. Novel materials synthesis by mechanical alloying/milling / S. Ranganathan // International Materials Reviews. - 1998. - V. 43. - N.3. - P. 101-141.
7. Suryanarayana, C. /Mechanical Alloying and Milling / Marcel Dekker, Inc., New York. - 2004. - P. 466.
8. Кузмищ, Ю.В. Механическое легирование / И.Г. Колесникова, В.И. Себра, Б.М. Фрейдин - Москва: Наука. - 2005. - 213 с.
9. Sanchez F.H., Tool induced contamination of elemental powders during mechanical milling / C.F. Rodriguez Torres, M.B. Fernandez van Raap, L. Mendoza Zelis // Hyperfine interactions. - 1998. - V.113. - P. 269-277.
10. Takacs, L. Self-sustaining reactions induced by ball milling // Progress in Materials Science. - 2002. - V.47. - P. 355-414.
11. Хасанов, О.Л. Оже-спектрокопия механоактивированных порошков диборида циркония / И.А. Шулепов, В.В. Полисадова, А.А. Качаев, Э.С. Двилис, З.Г. Бикбаева // Известия Томского политехнического университета. - 2011. - Т. 138, №2. - С. 131-136.
12. Srinivasan, S. Metastable phases in the Al3X (X = Ti, Zr, and Hf) intermetallic system / P. B. Desch, R. B. Schwarz // Scripta Metallurgica et materialia. - 1991. - V. 25. - P. 2513-2516.
13. Романьков, С.Е. Получение композиционных Ti-Al покрытий методом механосинтеза / Ж.Б. Сагдолдина, С.Д. Калошкин, Е.В. Каевецер // Физика металлов и металловедение. - 2008. - Т.106. - №1. - С.70-78.
14. Lü, L. Mechanical Alloying / M. O. Lai. - USA: Kluwer Academic Publishers. - 1998. - 276 p.
15. Лякишев, Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем, I-том. - Москва: Машиностроение. - 1996. - 498 с.
16. Luo, J.S. Phase evolution and alloying mechanism of titanium aluminide nanoparticles / K. Li, X.B. Li, Y.J. Shu, Y.J. Tang // Journal of Alloys and Compounds. - 2014. - V. 615. - P. 333-337.

Ti-Al ҰНТАҚ ҚОСПАСЫН ТИТАННЫҢ VT1-0 БЕТКІ ҚАБАТЫНДА МЕХАНИКАЛЫҚ ҚОРЫТУ

^{1,2)} Сагдолдина Ж.Б., ¹⁾ Скаков М.К., ³⁾ Виелеба В.

¹⁾ ҚР ҰҰО РМК «Атом энергиясы институт» филиалы, Курчатов, Қазақстан

²⁾ Семей қаласының Шәкәрім атындағы Мемлекеттік университеті, Семей, Қазақстан

³⁾ Вроцлав техникалық университеті, Вроцлав, Польша

Бұл мақалада титанның беткі қабатында Ti-Al жабын қабатын механикалық қорытпа әдісі арқылы түзілісін зерттеу нәтижелері ұсынылған. Жабын қабатының түзілу үрдісі кезінде титан ұнтағының бөлшектері ұнтақ қоспасының пластикалық құраушысы алюминиймен көмкеріліп, жабын қабаты композициясына орнығады. Шарлардың соғу әсерінен жабын қабатының ішкі құрылымдық бөліктері тиімді араласып, нәтижесінде тығыз және берік жабын қабаты түзіледі. Төсем мен жабын қабатының шекарасын зерттеу нәтижесі жабын қабаты мен төсем арасында диффузия процессінің орын алмағанын анықтады. Жабын қабатын 600–900 °C температура аралығында жылулық өңдеуден кейін диффузиялық процесстердің күшейтілу әсерінен Ti-Al жүйесінің интерметаллдық қосылыстары түзілді. Механикалық қорытпа процессі арқылы интерметаллидтер қоспасының түзілуін жылдамдату мақсатымен жылулық өңдеуді кешенді өңдеу сипатында қолдану ұсынылады. Адгезиялық қатаңдықты салыстырмалы бағалау нәтижесі, 900 °C жылулық өңдеуден кейін бұл сипаттаманың жоғарлауын көрсетті. Жылулық өңдеуден кейін адгезияның жақсаруы, деформациялық араласу процессінен кейін құрылымдық релаксацияны жеңілдететін диффузия процессімен байланысты болуы мүмкін.

**MECHANICAL ALLOYING OF Ti-Al POWDER MIXTURES
ON THE SURFACE OF TITANIUM GRADE-1**

^{1,2)} Zh.B. Sagdoldina, ¹⁾ M.K. Skakov, ³⁾ W. Wieleba

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

²⁾ Shakarim State University of Semey, Semey, Kazakhstan

³⁾ Wroclaw University of Science and Technology, Wroclav, Poland

The paper presents the results of study of formation of Ti-Al coatings on the titanium surface by mechanical alloying technique. It is shown that in the formation of coatings the titanium particles are enveloped by plastic components of the aluminum mixture and build up in the coating composition. Under the influence of ball impacts the internal structure of the components of coatings is effectively mixed, as a result the dense and strong coating is formed. Study of the substrate-coating interface showed practical absence of traces of coating diffusion into the substrate. It is shown that were formed intermetallic compounds of the Ti-Al system when the coatings were annealed in the temperature range 600–900 °C due to the acceleration of the diffusion processes. Thermal annealing should be used as a complex treatment of the sample surface for accelerate the formation of Ti-Al intermetallides in the mechanical alloying process. The results of a comparative evaluation of the adhesive strength showed that the adhesive improvement was observed after annealing at 900 °C. The improvement in adhesion after annealing can be associated with diffusion processes that can facilitate structural relaxation after the process of deformation mixing.

УДК 621.039.586

АНАЛИЗ ПРОЕКТНЫХ АВАРИЙ НА РЕАКТОРЕ ИВГ.1М

Байгожина А.А., Иркимбеков Р.А., Жагипарова Л.К.

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

В статье представлены результаты анализа проектных аварий на реакторе ИВГ.1М с топливом низкого обогащения. Рассмотрены различные аварийные ситуации: с прекращением подачи теплоносителя, падением расхода теплоносителя, падением физического макета в активную зону. Показана опасность аварийной ситуации при отказе аварийной защиты.

ВВЕДЕНИЕ

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

Исследовательские реакторы, работающие на высокообогащенном урановом топливе, противоречат концепции устойчивых к распространению ядерного оружия ядерных технологий, поскольку основное потребление высокообогащенного топлива в гражданских целях осуществляется именно на них. Кроме того, удаление высокообогащенного урана с площадок исследовательских реакторов благоприятно сказывается на обеспечении безопасности эксплуатируемых объектов. По этим причинам проводятся международные мероприятия по прекращению использования высокообогащенного урана в исследовательских реакторах посредством конверсии этих установок на низкообогащенное топливо [2].

Реактор ИВГ.1М представляет собой исследовательский корпусной ядерный реактор на тепловых нейтронах с легководным замедлителем и теплоносителем, и бериллиевым отражателем нейтронов. Конструктивные, технические и теплофизические параметры реактора ИВГ.1М позволяют решать задачи исследований последствий развития аварийных ситуаций в ядерных реакторах в экологическом аспекте, изучать рабочие процессы, связанные с применением различных типов тепловыделяющих сборок (ТВС) и теплоносителей для объектов испытаний, а также задачи радиационного материаловедения в рамках комплексных программ по изучению проблем безопасности АЭС [3].

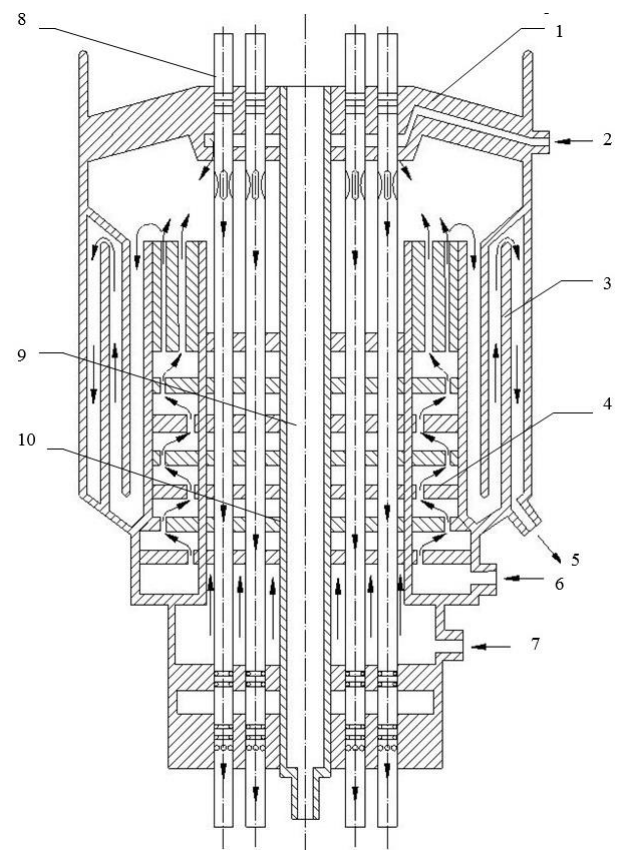
Одной из важных задач, для обеспечения безопасности реактора ИВГ.1М с новым типом топлива, является моделирование различных аварийных режимов. Это позволяет поэтапно прогнозировать развитие аварийных ситуаций реактора. На основе полученных данных составляется план мероприятий по управлению аварийным режимом.

1 ОПИСАНИЕ ПРОЕКТНЫХ АВАРИЙ

1.1 Отказ арматуры контура охлаждения на входном участке тракта

На рисунке 1 приведена схема охлаждения конструктивных элементов ИР ИВГ.1М. Разрез реактора проведен в плоскости между регулируемыми барабанами.

Вода на охлаждение ТВС и отражателя поступает через патрубки 2, 6 и 7 (рисунок 1). В номинальном режиме установлено следующее соотношение расходов: патрубок 2 – 8 %, патрубок 6 – 31 %, патрубок 7 – 57 %.



1 – крышка; 2 – подача воды в крышку; 3 – тепловые экраны; 4 – отражатель; 5 – слив воды из корпуса; 6 – подача воды в отражатель; 7 – подача воды в центральную сборку; 8 – ТВС; 9 – петлевой канал; 10 – центральная сборка

Рисунок 1. Схема охлаждения реактора ИВГ.1М

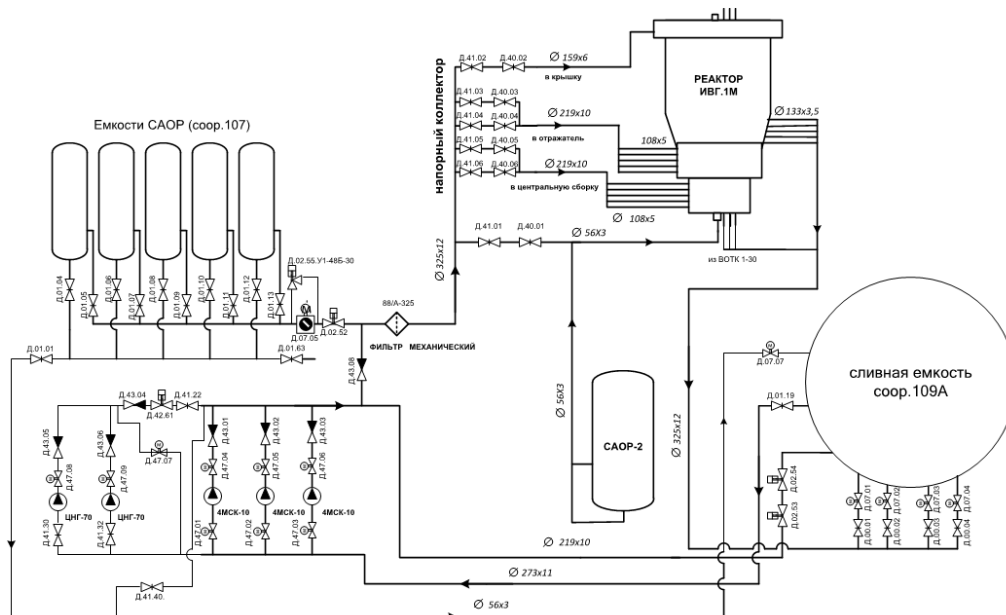


Рисунок 2. Водяная система реактора ИВГ.1М

Поступившая в корпус реактора вода выходит через ТВС в их нижней части, и патрубков 5 на корпусе реактора. Расход воды через ТВС составляет 3 % от поступления [3].

В случае незапланированного закрытия регулирующей и запорной арматуры входного участка тракта охлаждения реактора (рисунок 1, патрубки 2, 6 и 7) произойдет снижение расхода теплоносителя и снижение давления в корпусе реактора и, соответственно, нарушение режима охлаждения. Принято, что уменьшение расхода теплоносителя до 0,01 % номинального соответствует полному закрытию арматуры на входном участке. При этом считается, что давление теплоносителя в корпусе реактора падает до 0,1 МПа [4].

1.2 Отказ арматуры контура охлаждения на выходном участке тракта

Вследствие отказа шаровых кранов или регулирующих задвижек, установленных на выходном участке технологических каналов, произойдет увеличение гидравлического сопротивления выходного участка системы подачи воды, снижение расхода теплоносителя и увеличение давления в корпусе реактора. Принято, что уменьшение расхода теплоносителя до 0,01 % номинального соответствует полному закрытию арматуры на выходном участке. При этом давление теплоносителя в корпусе реактора принимается равным 1,0 МПа [4].

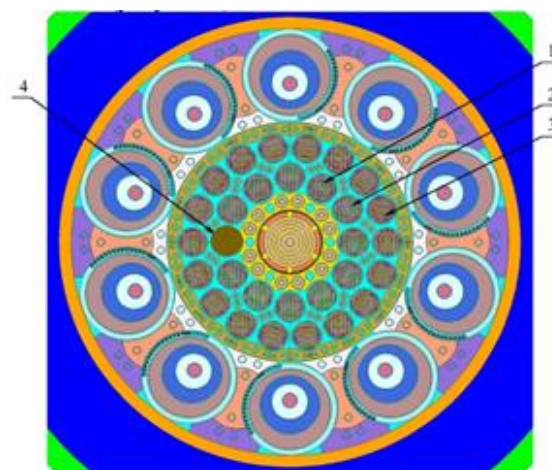
1.3 Отключение насосов контура охлаждения

Одновременное отключение трех насосов 4МСК-10 может произойти при отказе электропитания или, что маловероятно, при их одновременной поломке (рисунок 2). При возникновении такого отказа охлаждение реактора будет осуществляться с помощью

вытеснительной системы подачи (системы аварийного охлаждения реактора – САОР), которая в течение часа обеспечит подачу в реактор воды с необходимым расходом. Переход на САОР будет сопровождаться кратковременным падением расхода на 10-15 % от номинального уровня [4].

1.4 Ошибка персонала при загрузке ядерного топлива

Ядерное топливо в виде физического макета (ФМ) с ТВС загружено в ВОТК первого ряда. К незапланированному увеличению реактивности могут привести нарушения процесса загрузки ФМ. Критичным случаем нарушения является падение ФМ (рисунок 3).



1 – ВОРТК первого ряда; 2 – ВОРТК второго ряда;
3 – ВОРТК третьего ряда; 4 – падение ФМ

Рисунок 3. Поперечное сечение активной зоны реактора ИВГ.1М

Падение ФМ с ТВС в активную зону возможно только при наложении ряда нарушений правил безопасной эксплуатации реактора и отказов оборудования. Вероятность падения ФМ точно в свободную ячейку реактора не превышает 10^{-4} . Более вероятно падение ФМ с предварительной частичной его установкой в ячейку верхней крышки реактора. Падение ФМ происходит в ячейку реактора, заполненного водой, с высоты ~ 2 м за время не менее 2 с. В модели ФМ помещен в ВОТК первого ряда. Произведен расчет вносимой реактивности и нейтронно-физических параметров активной зоны. Расчеты проводились для случая нахождения ФМ в воздушной и водных средах [4].

2 УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТА

Начальное состояние реактора перед аварийной ситуацией принято следующее:

- мощность 10 МВт;
- расход теплоносителя через ВОТК 62,5 кг/с;
- максимальная температура воды, принятая регламентом на входе в реактор в штатном режиме – 323 К.

Аварийная защита реактора сработает при следующих событиях:

- реактивность реактора превысит $0,4 \beta_{\text{эфф}}$;
- мощность реактора превысит заданную номинальную мощность на 20 %;
- период реактора станет меньше 10 с.

Характеристики срабатывания аварийной защиты:

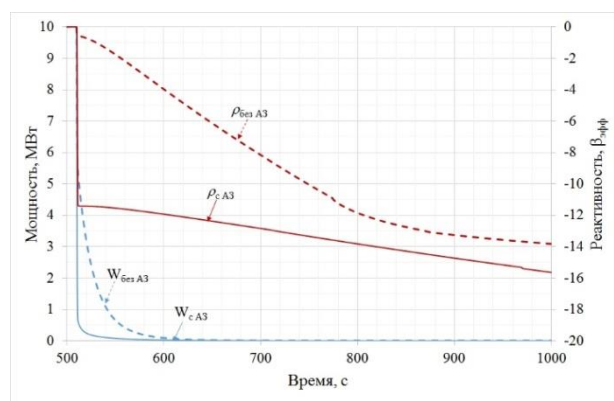
- задержка времени срабатывания аварийной защиты – 0,3 с;
- скорость разворота системы РБ – 120° c^{-1} .

Для определения характеристик реактора перед развитием аварии задается постоянная мощность и моделируется работа реактора до установления стационарного температурного поля (500 с). После этого в программе включается учет эффектов реактивности в зависимости от изменения температуры элементов активной зоны. В течение 10 с реактор работает в номинальном режиме. Затем моделируется соответствующее аварийное событие.

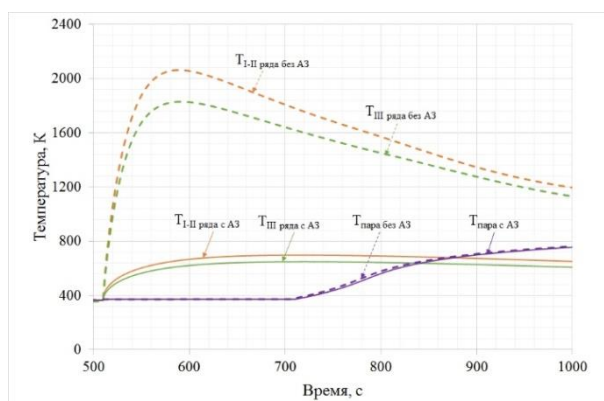
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ РАСЧЕТОВ

3.1 Отказ арматуры контура охлаждения на входном участке тракта

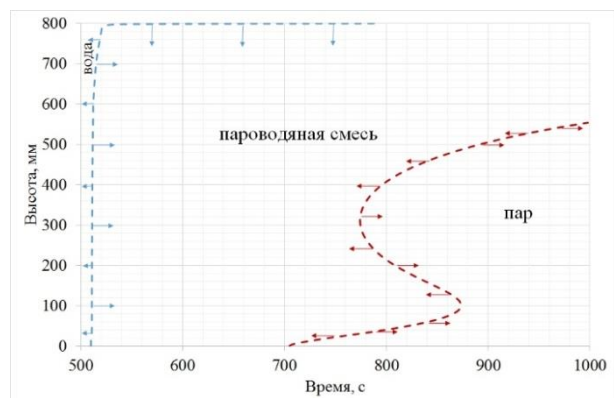
На рисунке 4-а представлено изменение мощности и реактивности реактора во времени.



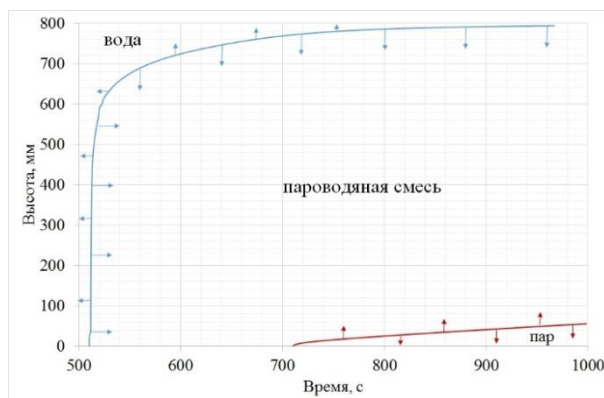
а) изменение мощности и реактивности реактора во времени



б) изменение температуры теплоносителя и твэлов во времени



в) распределение температуры фазового перехода по высоте ВОТК и времени без срабатывания аварийной защиты



г) распределение температуры фазового перехода по высоте ВОТК и времени со срабатыванием аварийной защиты

Рисунок 4. Изменение мощности, реактивности и температуры реактора во времени

На рисунке 4-б представлен график изменения температуры теплоносителя и твэлов во времени. На рисунке 4-в представлен график достижения температуры фазового перехода водного теплоносителя по высоте БОТК при отказе аварийной защиты, на рисунке 4-г со срабатыванием аварийной защиты.

В варианте без срабатывания аварийной защиты через 1 с после начала аварии температура воды достигает точки кипения практически по всей высоте активной зоны. Через 80 с температура твэлов достигнет максимума, в первых рядах 2000 К, в третьем 1900 К. Через 300 с произойдет полная потеря теплоносителя в ТВС, а температура твэлов понизится до ~1100 К. В корпусе реактора остается небольшое количество воды, уменьшающееся со временем. Испарение воды в это время происходит за счет остаточного энерговыделения, обусловленного распадом продуктов деления.

При срабатывании аварийной защиты через 1,5 с после начала развития аварии температура воды во всех каналах достигает точки кипения. Через 500 с после начала развития аварии температура твэлов станет равной ~600 К.

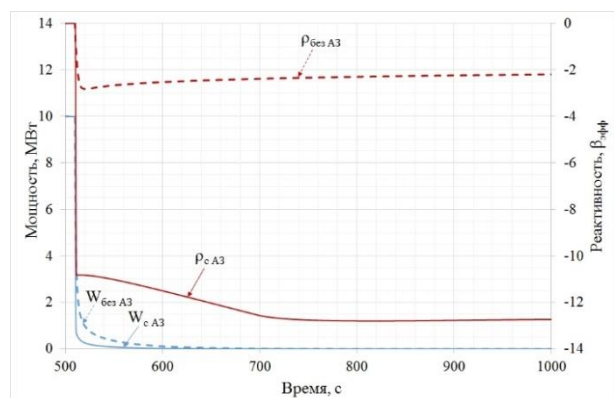
3.2 Отказ арматуры контура охлаждения на выходном участке тракта

На рисунке 5-а представлено изменение мощно-

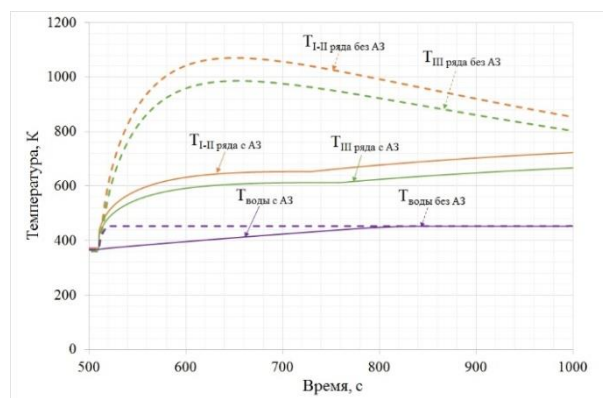
сти и реактивности реактора во времени. На рисунке 5-б представлен график изменения температуры теплоносителя и твэлов во времени. На рисунке 5-в представлен график достижения температуры фазового перехода водного теплоносителя по высоте БОТК при отказе аварийной защиты, на рисунке 5-г при срабатывании аварийной защиты.

В варианте без срабатывания аварийной защиты через 12 с после начала аварии температура воды достигает точки кипения практически по всей высоте активной зоны. Через 140 с температура твэлов достигнет максимума, в первых рядах 1070 К, в третьем 985 К. Через 440 с произойдет полная потеря теплоносителя в ТВС, а температура твэлов понизится до ~800 К. В корпусе реактора остается небольшое количество воды, уменьшающееся со временем. Испарение воды в это время происходит за счет остаточного энерговыделения, обусловленного распадом продуктов деления.

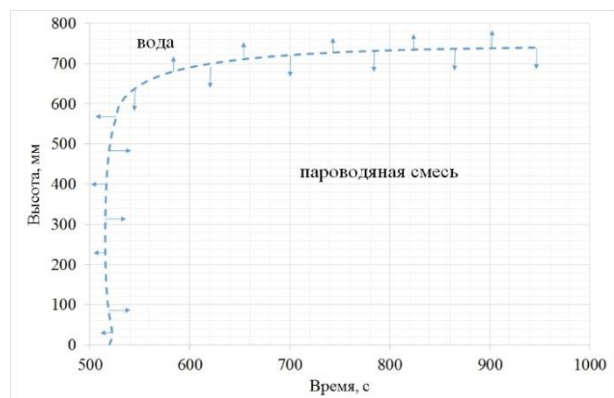
При срабатывании аварийной защиты через 230 с после начала развития аварии температура воды во всех каналах достигает точки кипения. Через 500 с после начала развития аварии температура твэлов станет равной ~700 К.



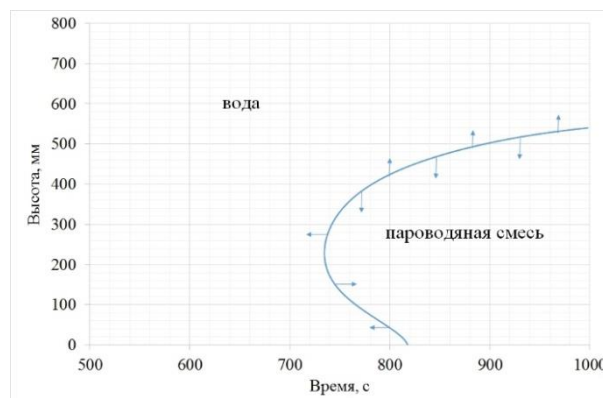
а) изменение мощности и реактивности реактора во времени



б) изменение температуры воды и топлива во времени

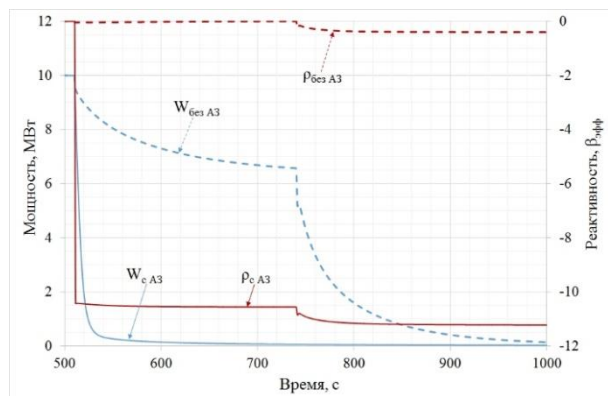


в) динамика фазового перехода по высоте БОТК без срабатывания аварийной защиты

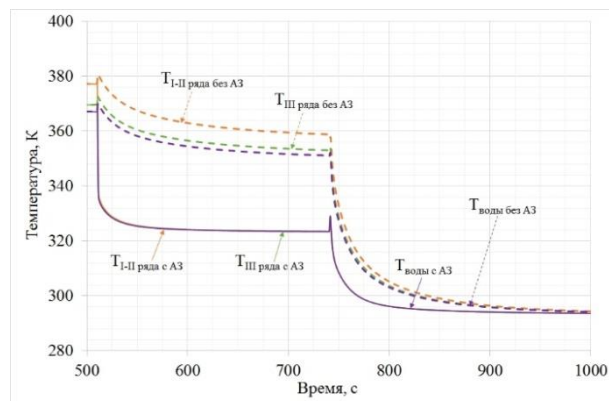


г) динамика фазового перехода по высоте БОТК при срабатывании аварийной защиты

Рисунок 5. Изменение мощности, реактивности и температуры реактора во времени



а) изменение мощности и реактивности реактора во времени



б) изменение температуры воды и твэлов во времени

Рисунок 6. Изменение мощности, реактивности и температуры реактора во времени

3.3 Отключение насосов контура охлаждения

При отказе аварийной защиты повышение температуры в ВОТК вызовет временное снижение реактивности, следствием чего станет падение мощности реактора и изменение температурного поля. Реактор перейдет в новое критическое состояние, соответствующее новому установившемуся температурному полю активной зоны. Температура воды кратковременно увеличивается на 3 К, после чего падает в соответствии с уменьшением мощности (рисунок 6-а, б).

При срабатывании аварийной защиты реактор останавливается в штатном режиме. Температура топлива и теплоносителя в этом случае меньше, чем без срабатывания аварийной защиты.

3.4 Ошибка персонала при загрузке ядерного топлива

С помощью программы MCNP [5] были проведены нейтронно-физические расчеты реактора ИВГ.1М для оценки эффекта реактивности от загрузки ФМ в ячейку реактора заполненную воздухом. Эффект реактивности составит $1,93 \beta_{эфф} \pm 0,01$. Что недостаточно для достижения критического состояния и дальнейшее развитие аварии не рассматривается.

Эффект реактивности от загрузки ФМ в ячейку реактора заполненную водой составит $2,9 \beta_{эфф} \pm 0,01$, которые вводятся в течение 2 с. С учетом погрешности $0,01 \beta_{эфф}$ реактор может быть переведен в надкритическое состояние с реактивностью $0,13 \beta_{эфф}$.

На рисунке 7 представлено изменение мощности и реактивности во времени в ситуации с водой в канале. В момент начала аварийного события мощность принята равной $3,6 \cdot 10^{-6}$ Вт. При падении ФМ реактор перейдет в надкритическое состояние с реактивностью $0,13 \beta_{эфф}$.

При отказе аварийной защиты происходит постепенное увеличение мощности с периодом 240 с соответствующий реактивности $0,13 \beta_{эфф}$. СУЗ реактора не отреагируют в автоматическом режиме на про-

изошедшую аварию поскольку превышения уставок не произойдет. Однако при введении положительной реактивности реактор начнет набирать мощность, поэтому аварийную защиту оператор может сбросить вручную при обнаружении аварийной ситуации. Принято, что аварийная защита сработает при ручном включении через 10 с после начала развития аварийной ситуации.

При срабатывании аварийной защиты происходит перевод реактора в подкритическое состояние и падение мощности.

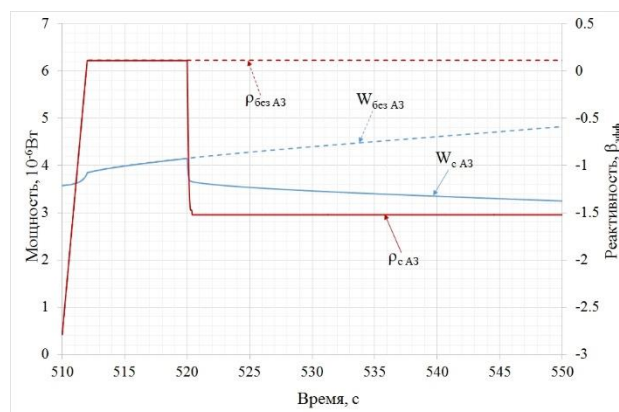


Рисунок 7. Изменение мощности и реактивности в ситуации с водой в канале

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было рассмотрено 8 аварийных ситуаций реактора ИВГ.1М с топливом низкого обогащения – при отказе аварийной защиты и со срабатыванием аварийной защиты:

- отказ арматуры контура охлаждения на входном участке тракта;
- отказ арматуры контура охлаждения на выходном участке тракта;
- отключение насосов контура охлаждения;
- ошибка персонала при загрузке ядерного топлива.

Проведенные расчеты показали, что аварийная защита реактора обеспечивает безопасность реактора при кратковременном падении расхода теплоносителя, падении ФМ в активную зону. В аварийной ситуации с прекращением подачи теплоносителя наблюдается кипение теплоносителя. Для безопасной

работы реактора рекомендуется использовать дополнительные средства контроля и безопасности.

Показана опасность ситуаций при отказе срабатывания аварийной защиты. Результаты проведенных расчетов представлены в технических справках [6–8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ванеев Ю.Е. Развитие методов расчетного сопровождения эксплуатации исследовательских реакторов с применением прецизионных программ: автореф. дис. ... доктор техн. наук: 05.13.18. – Москва, 2014. – 42 с.
2. Руппель В.А. Перевод исследовательского реактора МИР.М1 на низкообогащенное UO_2+Al топливо: 140404 Атомные электрические станции и установки. – Томск, 2016.
3. Описание реактора ИВГ.1М: отчет (Deliverable 2.1 under Contract 0J-30461-0001A) / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК. рук. А.Д. Вурим, А.Н. Колбаенков, В.С. Гныря – Курчатов, 2010. – 42 с. Инв. №37-370-01 / 1729 вн. от 10.11.2010.
4. Определение сценариев аварии ИР ИВГ.1М с ВОТК-НОУ (IAE for Deliverable 8.1 of the IVG feasibility study under ANL Contract 0J-30461-0008A) / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК. рук. А.Д. Вурим, А.А. Колодешников, В.С. Гныря, Е.Б. Бейсембаев – Курчатов, 2014. – 20 с.
5. MCNP-5.1.40 Monte-Carlo N-Particle Transport Code; Los Alamos National Laboratory; Los Alamos, New Mexico. – April 24, 2003.
6. Анализ безопасности при отказе арматуры контура охлаждения ИВГ.1М с ВОТК-НОУ: техническая справка / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК Р.А. Иркимбеков, А.А. Байгожина – Курчатов, 2017. – 11 с. №11-220-01 / 398 вн. от 03.03.2017.
7. Анализ безопасности ИВГ.1М при отключении насосов контура охлаждения: техническая справка / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК А.В. Пахниц, Р.А. Иркимбеков, А.А. Байгожина – Курчатов, 2017. – 8 с. №11-220-01 / 469 вн. от 29.03.2017.
8. Анализ безопасности ИВГ.1М при ошибке персонала при загрузке ядерного топлива: техническая справка / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК А.В. Пахниц, Р.А. Иркимбеков, А.А. Байгожина – Курчатов, 2017. – 6 с. №11-220-02 / 636 вн. от 20.04.2017.

ИВГ.1М РЕКТОРДЫҢ ЖОБАЛЫҚ АПАТТАРДЫ ТАЛДАУ

Байгожина А.А., Иркимбеков Р.А., Жагипарова Л.К.

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институт» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Мақалада төмен байытылған отынмен ИВГ.1М ректордың жобалық апаттарды талдауы көрсетілген. Өр түрлі жобалық апаттар қарастырылған: жылутасығыш беруін тоқтату, жылутасығыштың шығысы құлауы, активті аймаққа физикалық макетін құлауы. Авариялық қорғанысының істен шығу жағдайында авариялық жағдайынын қауіп-қатері көрсетілген.

ANALYSIS OF DESIGN ACCIDENTS ON THE IVG.1M REACTOR

A.A. Baigozhina, R.A. Irkimbekov, L.K. Zhagiparova

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

The article presents the results of the analysis of design accidents at the IVG.1M reactor with low-enrichment fuel. Various emergency situations are considered: with the termination of the coolant supply, the drop in the flow of the coolant, the fall of the physical model into the active zone. The danger of an emergency is shown in the event of failure of an emergency protection.

УДК 621.039.5

ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИГР С ТОПЛИВОМ НИЗКОГО ОБОГАЩЕНИЯ

Бекмагамбетова Б.Е., Вурим А.Д., Котов В.М., Пахниц А.В., Иркимбеков Р.А.,
Байгожина А.А., Жагипарова Л.К., Мурзагалиева А.А.

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

В статье представлены результаты исследований возможности перевода реактора ИГР с высокообогащенного уранового топлива на низкообогащенное. Показано, что при рассмотренных конфигурациях в «горячем» реакторе существенно уменьшается поток тепловых нейтронов в ЦЭК, возможно превышение допустимой температуры воды на выходе из неподвижной ампулы ЦЭК, что указывает на необходимость продолжения поиска вариантов компоновки активной зоны реактора для сохранения его характеристик.

ВВЕДЕНИЕ

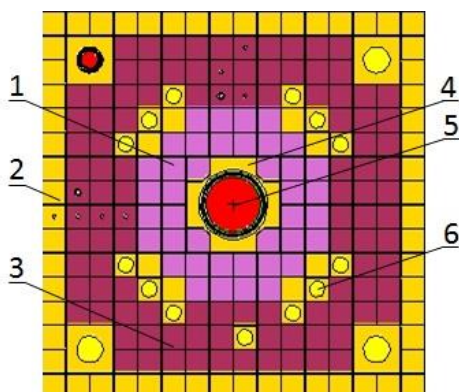
Исследовательский реактор ИГР – импульсный реактор на тепловых нейтронах с гомогенной уран-графитовой активной зоной теплоемкостного типа.

В связи с тем, что в реакторе ИГР используется высокообогащенное топливо, рассматривается возможность его конверсии с сохранением его технических характеристик [1]:

- максимальная плотность потока тепловых нейтронов в ЦЭК $7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$;
- максимальный флюенс тепловых нейтронов за пуск $3,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$;
- физический вес облучательных устройств (объектов испытаний), загружаемых в ЦЭК от -7.0 до $+3.5 \beta_{\text{эф}}$.

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

В программе MCNP5 построена модель для нейтронно-физических расчетов в деталях описывающая реальную конструкцию реактора ИГР (рисунок 1). Выполнена оценка возможности снижения обогащения топлива по урану-235 до 20 %.



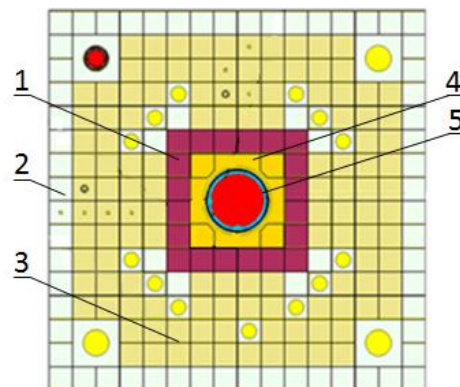
1 – подвижная часть кладки; 2 – боковой отражатель; 3 – неподвижная часть кладки; 4 – крестообразная втулка; 5 – центральный экспериментальный канал; 6 – канал стержня регулирования.

Рисунок 1. Реактор ИГР с ВОУ топливом

При разработке варианта модернизации подобран состав топливных графитовых блоков с низкообогащенным топливом, отработаны возможные варианты замены некоторых конструктивных эле-

ментов на аналогичные детали из материалов с низким сечением поглощения нейтронов (таблица 1).

Наилучшие характеристики реактора с низкообогащенным топливом получены при 2-х кратном увеличении концентрации урана-235 в топливных графитовых блоках, кроме внутреннего ряда графитовых колон, прилегающих к центральному отражателю. В графитовой крестообразной втулке и 4 центральных топливных колоннах конструктивные элементы заменены на аналогичные из оксида бериллия. В неподвижной ампуле ЦЭК алюминий заменен на цирконий (рисунок 2, вариант 6 таблицы 1) [2].



1 – топливные блоки, прилегающие к ЦЭК; 2 – отражатель; 3 – топливные блоки активной зоны; 4 – оксид бериллия; 5 – кожух из циркония.

Рисунок 2. Реактор ИГР с НОУ топливом

С использованием программного комплекса ANSYS проведен теплофизический расчет, позволяющий определить температуру кладки активной зоны в любой точке реактора при реализации заданной диаграммы мощности [3]. Энерговыведение по объему активной зоны и по высоте центрального бериллиевого отражателя предварительно было рассчитано в MCNP5.

В процессе разогрева при максимально возможном энерговыведении в реакторе, равном 5,2 ГДж, максимальная температура бериллиевого центрального отражателя достигает 893 К, максимальная температура топливных графитовых блоков, прилегающих к бериллиевым, 1374 К.

Таблица 1. Варианты реактора ИГР-НОУ, рассмотренные для сравнения

№ варианта	Описание моделей	Запас реактивности	Поток тепловых нейтронов в ЦЭК, (ИГР-НОУ/ИГР-ВОУ), %
	ИГР-ВОУ	28,06 β	100
1	Установлены топливные блоки НОУ с концентрацией урана-235 в два раза больше чем в ИГР-ВОУ	22,29 β	64
2	Такая же, как (1), плюс блоки оксида бериллия установлены в крестообразной втулке и в 4 центральных топливных блоках	23,07 β	87
3	Такая же, как (2), плюс установлены блоки оксида бериллия в первой колонне внешнего отражателя	26,8 β	82
4	Такая же, как (3), плюс в неподвижной ампуле ЦЭК алюминий заменен на цирконий	27,0 β	90
5	Такая же, как (2), плюс в неподвижной ампуле ЦЭК алюминий заменен на цирконий	23,9 β	94
6	Такая же, как (5), плюс во внутреннем ряду установлены топливные блоки с концентрацией урана-235 как в ИГР-ВОУ	20,96 β	97

Таблица 2. Нейтронно-физические параметры реактора ИГР для различных конфигураций активной зоны

Состояние реактора		Коэффициент размножения, k_{eff}	Запас реактивности, ρ	Поток тепловых нейтронов в ЦЭК (ИГР-НОУ/ИГР-ВОУ)
«Холодный» реактор	ИГР-ВОУ	1,23795	28,06028	0,955
	ИГР-НОУ	1,18025	19,97841	
«Горячий» реактор	ИГР-ВОУ	1,09768	12,99090	0,832
	ИГР-НОУ	1,06942	6,86424	

РАСЧЕТ РЕАКТОРА С ТОПЛИВОМ НОУ

Для реактора НОУ проведен нейтронно-физический расчет с целью оценки потока тепловых нейтронов в ампуле ЦЭК, распределения мощности в материале ЦЭК, запаса реактивности в «холодном» и «горячем» реакторе [4].

В модели реактора ИГР для топливных блоков задана температура 293,6 К в «холодном» состоянии, в «горячем» – 1200 К, температура графитовых блоков непропитанных ураном 600 К.

Вычислены коэффициенты размножения и поток тепловых нейтронов в ЦЭК для конфигурации ИГР с извлеченными из активной зоны стержнями регулирования. Результаты нейтронно-физических расчетов приведены в таблице 2. По результатам расчета поток тепловых нейтронов в ЦЭК в «горячем» реакторе с НОУ топливом уменьшается на 17 %.

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НЕПОДВИЖНОЙ АМПУЛЫ НА-228

В условиях конверсии принятая конструкция активной зоны предполагает замену алюминиевого кожуха центрального экспериментального канала на циркониевый. За счет высокой поглощаемой мощности γ -излучения замененный материал быстрее разогревается, что приведет к дополнительным проблемам с охлаждением. Поскольку допустимая рабочая температура крепления крышки ампулы 55 °С, проведен теплогидравлический расчет оценки перегрева. Распределение мощности в материале ЦЭК реактора ИГР при работе реактора на максимальной интегральной мощности 5,2 ГДж представлен на рисунке 3.

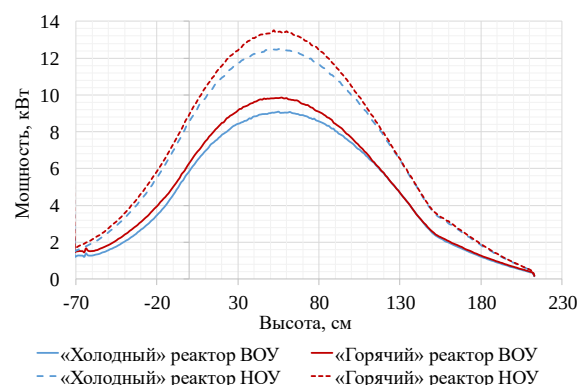


Рисунок 3. Распределение мощности в ЦЭК реактора ИГР

Расчет разогрева теплоносителя модернизированной ампулы показывает, что при наиболее нагруженном режиме работы реактора максимальная температура теплоносителя на выходе из ампулы достигает 70 °С. Это может оказать негативное воздействие на элементы системы охлаждения.

КИНЕТИКА РЕАКТОРА ИГР

Для моделирования динамических режимов работы реактора создан «кинетический» расчетный код, который был верифицирован по параметрам нейтронных всплесков реактора ИГР-ВОУ [5].

Для пуска 121Ф-10 сравнение расчетных значений реактивности и мощности с экспериментальными данными представлено на рисунках 4 и 5, расчетное изменение мощности для вариантов ИГР-ВОУ и ИГР НОУ показана на рисунке 6 (таблица 3).

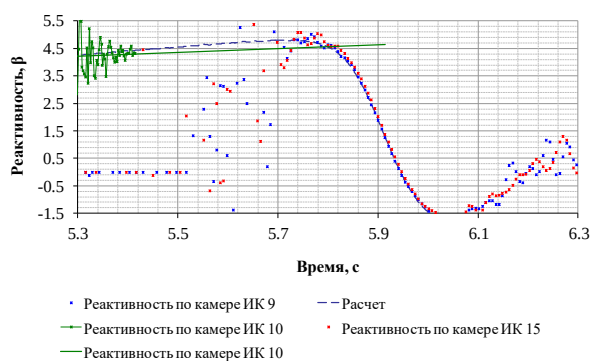


Рисунок 4. Расчетное и зарегистрированное изменение реактивности во время пуска 121Ф – 10

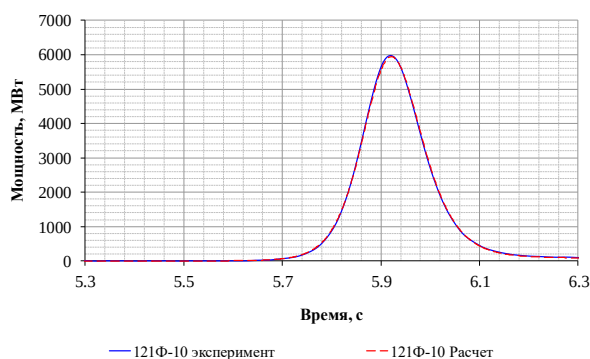


Рисунок 5. Расчетное и зарегистрированное изменение мощности во время пуска 121Ф – 10

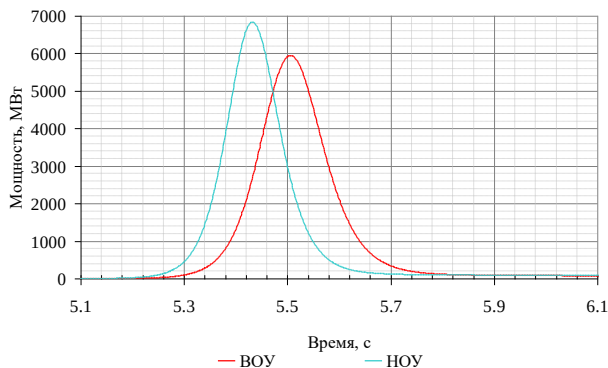


Рисунок 6. Расчетное изменение мощности во время пуска 121Ф-10 для вариантов ИГР-ВОУ и ИГР НОУ

Результаты моделирования кинетики ИГР показывают, что в связи с уменьшением в реакторе ИГР-

НОУ температурного коэффициента реактивности и времени жизни мгновенных нейтронов:

- реализация одних и тех же динамических режимов работы реактора требует меньшего ввода положительной реактивности;
- при одной и той же максимальной мощности нейтронной вспышки ее длительность уменьшается.

Таблица 3. Значения параметров пуска серии 121Ф-10

Параметры	Эксперимент	Расчет с ВОУ	Расчет с НОУ
Скачок реактивности, β	4,16	4,82	4,01
Полуширина импульса, с	0,142	0,142	0,118
Максимальная мощность, МВт	5975	5947	6834
Интегральная мощность, МДж	1094	1004	1096
Начальная температура, °С	28	27	27
Конечная температура, °С	307	332	330
Разнится температур, °С	279	305	303

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием трехмерной модели MCNP для нейтронно-физических расчетов определены запас реактивности, распределение плотности потока тепловых нейтронов в экспериментальных каналах, распределение энерговыделения в активной зоне. Распределение температуры в графитовой кладке рассчитаны с использованием трехмерной модели созданной в программном комплексе ANSYS Mechanical. Проведен теплогидравлический расчет неподвижной ампулы в ЦЭК для оценки перегрева циркониевого кожуха. Для моделирования динамических режимов на языке Visual Basic создан «кинетический» расчетный код, который был верифицирован по параметрам нейтронных вспышек существующего реактора.

По результатам расчетных исследований:

- запас реактивности в реакторе с НОУ топливом меньше;
- поток тепловых нейтронов в ЦЭК будет меньше, на 4,5 % в «холодном» и на 17 % в «горячем» реакторе;
- в модернизированной ампуле возможен перегрев элементов системы охлаждения.

В связи с несоответствием расчетных данных условиям конверсии продолжается поиск конфигурации активной зоны, которая удовлетворяла бы всем требованиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Описание реактора ИГР: отчет (Deliverable 1.1 under Contract 0J-30461-0001A) / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК; А.Д. Вурим, А.А. Колодешников, В.А. Гайдайчук.– Курчатов, 2011. – 40 с.
2. Характеристики активной зоны реактора ИГР с низкообогащенным ураном: отчет (Deliverable 1.3 under Contract 0J-30461-0001B) / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК. рук. А.А. Колодешников, А.Д. Вурим, В.А. Зуев – Курчатов, 2012. – 21 с.
3. Оценка применимости бериллия и его оксида в качестве материала для внутреннего отражателя реактора ИГР-НОУ: отчет (Deliverable 5.1 under Contract 0J-30461-0005A) / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК; А.Д. Вурим, А.А. Колодешников, В.М. Котов, В.В. Бакланов, В.А. Зуев, В.А. Гайдайчук. – Курчатов, 2012. – 43 С.
4. Байгожина, А.А. Возможность сохранения эксплуатационных характеристик реактора ИГР при конверсии / А.А. Байгожина, Р.А. Иркимбеков, А.А. Мурзагалиева // Вестник НЯЦ РК. – Курчатов, сентябрь 2016. – Вып. 3. – С. 51–54.

5. Irkimbekov, R.A. HEU/LEU IGR Reactor Kinetics / R.A. Irkimbekov, A.D. Vurim, L.K. Zhagiparova, P.L. Garner, N.A. Hanan // RERTR-2014: сборник тезисов 35-ой Международной конференции: Вена, 12-16 октября 2014. – С. 33. – 0,06 / 0,03 п.л.

ТӨМЕН БАЙЫТЫЛҒАН ОТЫНЫ БАР ИГР СИПАТТАРЫН ЗЕРТТЕУ

**Бекмагамбетова Б.Е., Вурим А.Д., Котов В.М., Пахниц А.В., Иркимбеков Р.А.,
Байгожина А.А., Жагипарова Л.К., Мурзагалиева А.А.**

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

Мақалада жоғары байытылған уран отыны бар ИГР реакторының төмен байытылғанға ауысу мүмкіндіктерін зерттеу нәтижелері көрсетілген. «Ыстық» реакторда қарастырылған конфигурациялар кезінде ОТК жылу нейтрондарының ағымы елеулі төмендейтіндігі көрсетілген, ОТК жылжымайтын ампулынан шығуда судың рұқсат етілетін температурасы көтерілуі мүмкін, бұл оның сипаттарын сақтап қалу үшін активтік зонаның үйлестіру нұсқауларын іздеуді жалғастыру қажеттілігін көрсетеді.

RESEARCHES OF IGR CHARACTERISTICS WITH LOW ENRICHED FUEL

**B.Ye. Bekmagambetova, A.D. Vurim, V.M. Kotov, A.V. Pachnits, R.A. Irkimbekov,
A.A. Baygozhina, L.K. Zhagiparova, A.A. Murzagalieva**

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

The paper represents research results of possible conversion of IGR reactor from high-enriched uranium fuel to low-enriched uranium fuel. It is shown that on examined configurations in a «hot» reactor; thermal neutron flow in CEC, is significantly reduced, permissible temperature excess of water is possible on an output of a CEC fixed ampoule, which indicates necessity to continue of reactor core packaging for keeping its characteristics.

УДК 621.039

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РЕАКТОРА ИВГ.1М С ТОПЛИВОМ НИЗКОГО ОБОГАЩЕНИЯ

Жагипарова Л.К., Котов В.М.

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

В статье представлен анализ возможностей реактора ИВГ.1М с топливом низкого обогащения. Для расширения возможностей реактора с низкообогащенным урановым топливом в статье рассмотрены варианты изменения загрузки урана, в том числе с выполнением всех технологических каналов (ТК) одинаковой длины.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проводится модернизация реактора ИВГ.1М с заменой топлива высокого обогащения (90 %) на топливо низкого обогащения (менее 20 %). Изменяется состав топливной композиции уран-циркониевых твэлов [1], проводится незначительная модернизация ВОТК и ТВС реактора.

Для расширения возможностей реактора ИВГ.1М с топливом низкого обогащения рассмотрены варианты изменения загрузки урана и увеличения длины технологического канала (ТК) 3 ряда с 600 мм до 800 мм. При этом обеспечивается уменьшение неравномерности высотного распределения плотности потока тепловых нейтронов в петлевом канале и увеличение запаса реактивности.

При достаточном запасе реактивности модернизированного реактора ИВГ.1М с топливом низкого обогащения есть возможность проведения экспериментов с топливом многих энергетических реакторов в петлевом канале. В том числе исследований в обоснование безопасности топлива этих реакторов в аварийных ситуациях.

1 ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

ИВГ.1М – реактор на тепловых нейтронах с легководным замедлителем и теплоносителем и с бериллиевым отражателем нейтронов. Активная зона реактора представляет собой набор водоохлаждаемых технологических каналов (ВОТК) [2, 3].

Нейтронно-физические расчеты ИВГ.1М с топливом низкого обогащения выполнены с использованием расчетных моделей, верифицированных по параметрам ИВГ.1М с топливом высокого обогащения. Модель для нейтронно-физических расчетов (рисунок 1) разработана для работы с программным комплексом MCNP5 [4].

Целью расчетов является:

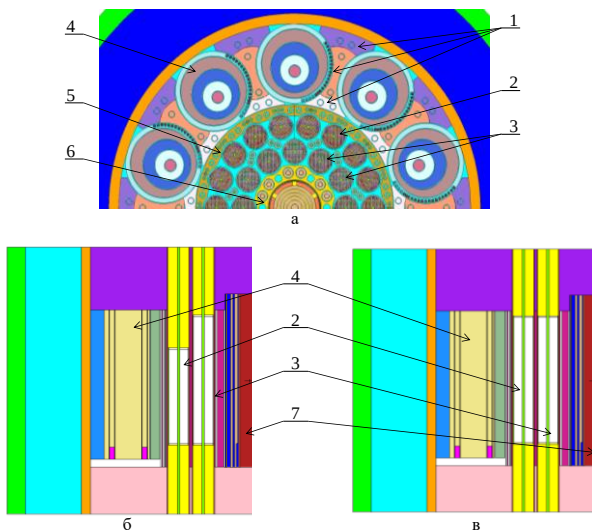
- определение изменений потока тепловых нейтронов в петлевом канале реактора ИВГ.1М в зависимости от характеристик топлива и ТК по отношению к потоку в реакторе;
- определение характеристик реактора и условий облучения при внесении в петлевой канал испытываемых ТВС различного типа.

2 ИССЛЕДУЕМЫЕ ВАРИАНТЫ РЕАКТОРА ИВГ.1М

Нейтронно-физические расчеты были выполнены для следующей конфигурации реактора: стержни компенсации реактивности СКР введены в реактор, в центральный канал установлена бериллиевая сборка 72.000.

Характеристики вариантов реактора представлены в таблице 1. Приняты следующие обозначения:

- ВОВ – реактор с топливом высокого обогащения;
- НОВ – реактор с топливом низкого обогащения с длиной ТК 3 ряда 600 мм [3].
- НОВ1-НОВ5 – реактор с топливом низкого обогащения с длиной ТК 3 ряда 800 мм, причем в вариантах НОВ2-НОВ5 в петлевом канале установлены 7 твэлов типа БН-350 с концентрацией ^{235}U 10 %;
- НОВ2 – в петлевом канале замедлитель и отражатель из бериллия;
- НОВ3-НОВ5 – в петлевом канале замедлитель и отражатель из графита;
- НОВ4 – в петлевом канале между твэлами и графитом установлен слой воды толщиной 10 мм;
- НОВ5 – в петлевом канале между твэлами и графитом установлен слой воды толщиной 5 мм.



1 – блок проставок; 2 – ВОТК третьего ряда; 3 – ВОТК первого и второго ряда; 4 – регулирующие барабаны; 5 – боковой вытеснитель; 6 – центральный вытеснитель; 7 – петлевой канал (ПК)

Рисунок 1. Сечение активной зоны реактора ИВГ.1М: а) поперечное сечение; б) вертикальное сечение с топливом высокого обогащения; в) вертикальное сечение с топливом низкого обогащения и ТК 3 ряда высотой 800 мм

Таблица 1. Варианты расчетов реактора ИВГ.1М

Конфигурация	ВОУ	НОУ	НОУ1	НОУ2	НОУ3	НОУ4	НОУ5
Длина ТК 3 ряда, мм	600		800				
Замедлитель в ПК				бериллий	графит	графит и вода	графит и вода
Отражатель в ПК				бериллий	С		
Обогащение в ИВГ, %	90	19,75					
Масса урана ²³⁵ U, кг	4,59	5,59					
Масса урана ²³⁵ U в 1 и 2 рядах, кг	1,98	2,40	2,68				
Масса урана ²³⁵ U в 3 ряду, кг	2,61	3,19	2,91				
Масса урана ²³⁵ U в ПК, кг	—	—	—	0,44			

Таблица 2. Результаты расчетов

Конфигурация	ВОУ	НОУ	НОУ1	НОУ2	НОУ3	НОУ4	НОУ5
Разворот барабанов, град	63	93	100	66	63	77	73
Запас реактивности, β	3,10	3,98	3,16	6,42	6,56	5,41	5,78
Эффективность РБ, β	11,71	11,35	10,74	9,51	9,39	9,89	9,58
Мощность ТВС в петлевом канале, кВт	—	—	—	226	241	181	197
Средний поток в реакторе, $\text{n}/(\text{см}^2\cdot\text{с})$	$4,32\cdot 10^{13}$	$3,67\cdot 10^{13}$	$3,57\cdot 10^{13}$	$3,55\cdot 10^{13}$			
Среднее значение потока в петлевом канале, $\text{n}/(\text{см}^2\cdot\text{с})$	$1,18\cdot 10^{14}$			$1,50\cdot 10^{13}$	$1,60\cdot 10^{13}$	$1,25\cdot 10^{13}$	$1,35\cdot 10^{13}$
Максимальный поток в петлевом канале, $\text{n}/(\text{см}^2\cdot\text{с})$	$1,68\cdot 10^{14}$	$1,67\cdot 10^{14}$	$1,54\cdot 10^{14}$	$2,05\cdot 10^{13}$	$2,16\cdot 10^{13}$	$1,74\cdot 10^{13}$	$1,83\cdot 10^{13}$
Отношение среднего потока в ТВС к среднему потоку по реактору	2,72	3,21	3,32	0,42	0,45	0,35	0,38
Отношение мощности в ТВС к мощности по реактору	—	—	—	0,038	0,040	0,030	0,033

3 РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В таблице 2 представлены результаты расчетов для рассмотренных вариантов.

Расчетные значения плотности потока тепловых нейтронов приведены к мощности реактора 6 МВт. Расчеты проводились для состояния реактора близкого к критическому. Приведены значения эффективного коэффициента размножения в реальном расчетном состоянии, угол поворота барабанов, соответствующий этому состоянию, запас реактивности и эффективность барабанов.

При увеличении длины технологического канала 3 ряда с сохранением общей массы ^{235}U , запас реактивности уменьшится. Если мы увеличим массу ^{235}U , то и увеличится значительно запас реактивности.

Средний поток в реакторе при одинаковой общей массе ^{235}U изменяется в пределах погрешности.

Среднее значение потока в петлевом канале не изменится, а вот максимальное значение потока в петлевом канале уменьшится на 8 %.

Так же из результатов расчетов видно, что при установке в петлевой канал ТВС из 7 твэлов запас реактивности увеличится. Наибольшее значение запаса реактивности в приведенных вариантах реактора отмечено при окружении ТВС вытеснителем и отражателем из графита. Близкий к нему вариант – при замене графита на бериллий.

На рисунке 2 представлены распределения пото-

ка тепловых нейтронов в петлевом канале. Для вариантов НОУ2-НОУ5 значения потоков показаны для топлива в петлевом канале.

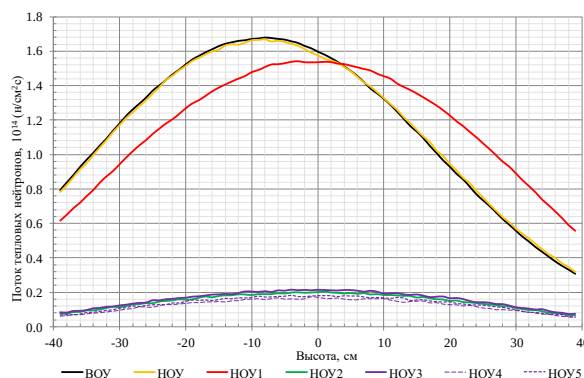


Рисунок 2. Распределение потока тепловых нейтронов в петлевом канале реактора ИВГ.1М

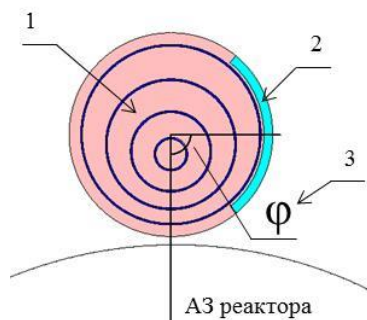
4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Положение РБ соответствует развороту центра слоя поглощающих элементов от активной зоны. На рисунке 3 показан разворот барабанов на угол ϕ .

На рисунке 4 показана зависимость между углом поворота регулирующих барабанов и запасом реактивности для реактора с топливом низкого обогащения. Характеристики реактора с топливом высокого обогащения изначально не могут сопрягаться в этой зависимости.

Таблица 3. Результаты расчетов

Конфигурация	ВОУ	НОУ	НОУ1	НОУ3
Положение РБ, град	180			
Обогащение, %	90	19,75		
Длина ТК 3 ряда, мм	600		800	
Замедлитель и отражатель в ПК	-			графит
Масса выгоревшего ^{235}U , кг	0,085	0,118	0,126	0,26
Интеграл мощности, МВт·час	1592	2470	2637	5380



1 – регулирующий барабан; 2 – поглощающий элемент;
3 – угол поворота поглощающего элемента

Рисунок 3. Разворот регулирующих барабанов:

Как и следует из логических соображений, при большем запасе реактивности поглощающий слой должен быть ближе к активной зоне. Получена хорошая линейность данной зависимости.

Так как в рассмотренных вариантах не достигается состояние с углом близким к нулю, то это говорит о возможности повышения запаса реактивности за счет различных мер – увеличения количества делящегося вещества в ТК, введении других типов испытываемых каналов в петлевой канал.

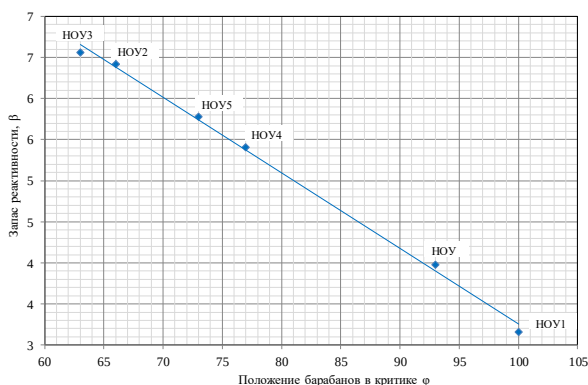


Рисунок 4. Зависимость между углом поворота РБ и запасом реактивности

5 СРАВНЕНИЕ С ВОЗМОЖНОСТЯМИ ИГР

В таблице 3 представлены результаты расчетов интеграла мощности и массы выгоревшего топлива ^{235}U .

Интеграл мощности реактора ИВГ.1М с топливом высокого обогащения с 1990 г по 2016 г составляет 1592 МВт·час.

Посчитан интеграл мощности реактора с топливом низкого обогащения для варианта НОУ, который составляет 2470 МВт·час, а для варианта НОУ1 2637 МВт·часов.

В настоящий момент на реакторе ИГР проводятся испытания различных ТВС. Интеграл мощности ИГР в одном пуске составляет 5200 МДж, а в ИВГ.1М с топливом низкого обогащения он может быть гораздо больше исходя из результатов расчетов. Можно сделать вывод, что увеличится длительность пуска и это показывает большие возможности испытаний различных ТВС.

Расчеты показывают, что при одинаковой мощности ТВС из семи твэлов, устанавливаемых в ИГР и ИВГ.1М, мощность реактора ИГР требуется в 5,5 раз больше. Интеграл мощности ИГР в одном пуске составляет 5200 МДж, а в ИВГ.1М он может быть большим в 6 раз. Таким образом, в реакторе ИВГ.1М может быть реализован пуск с данной ТВС с длительностью большей в 33 раза, чем в ИГР.

Это показывает большие возможности испытаний различных ТВС в реакторе ИВГ.1М с топливом низкого обогащения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установка в реактор ИВГ.1М с топливом низкого обогащения ТК третьего ряда длиной 800 мм приведет к уменьшению неравномерности высотного распределения плотности потока тепловых нейтронов в пустом петлевом канале и увеличению при этом запаса реактивности.

Рассмотрена возможность проведения экспериментов в ИВГ.1М с топливом энергетических реакторов в петлевом канале.

При установке в петлевой канал ТВС из 7 твэлов типа БН-350 с обогащением 10 % запас реактивности увеличится.

Наибольшее значение запаса реактивности в приведенных вариантах реактора отмечено при окружении ТВС в петлевом канале вытеснителем и отражателем из графита. Близкий к нему вариант – при замене графита на бериллий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Партия твэлов / Паспорт / ВШКЛ.506237.001ПС. / ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ» – 15.04.2014 – 9с.
2. Характеристика активной зоны реактора ИВГ.1М с высокообогащенным ураном: отчет (Deliverable 2.2 under Contract 0J-30461-0001A) / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК. рук. А.Д. Вурим, А.А. Колодешников.– Курчатов, 2011г. – 39с.
3. Характеристика активной зоны реактора ИВГ.1М с низкообогащенным ураном: отчет (IAE for deliverable 2.3 of the IVG.1M feasibility study under Contract 0J-30461-0001A) / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК. рук. А.А. Колодешников, А.Д. Вурим, В.А. Зуев – Курчатов, 2012. – 23 с.
4. MCNP-5.1.40 Monte-Carlo N-Particle Transport Code; Los Alamos National Laboratory; Los Alamos, New Mexico. – April 24, 2003.

ТӨМЕН БАЙЫТЫЛҒАН ОТЫНЫ БАР ИВГ.1М РЕАКТОРЫНЫҢ МҮМКІНДІКТЕРІН ТАЛДАУ

Жағипарова Л.К., Котов В.М.

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

Мақалада төмен байытылған отыны бар ИВГ.1М реакторының мүмкіндіктерін талдау берілген. Төмен байытылған ураны бар отынды реактордың мүмкіндігін кеңейту үшін мақалада уранды жүктеуді, сонымен қатар біркелкі ұзындықтағы барлық технологиялық каналдарды (ТК) орындаумен өзгертудің нұсқалары қарастырылған.

ANALYSIS OF POSSIBILITIES OF IVG.1M REACTOR WITH LOW ENRICHED FUEL

L.K. Zhagiparova, V.M. Kotov

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

The paper represents analysis of possibilities of IVG.1M reactor with low enriched fuel. Changing variants of uranium loading, particularly with implementing all technological channels of same length are studied for extension of reactor possibilities with low enriched uranium fuel.

УДК 621.039.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКТОРА ИВГ.1М

Жагипарова Л.К., Вурим А.Д., Котов В.М., Пахниц А.В., Иркимбеков Р.А.,
Байгожина А.А., Мурзагалиева А.А., Витюк Г.А.

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

В статье представлены модели реактора ИВГ.1М для нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов. Модели используются для расчетов характеристик реактора ИВГ.1М и модернизированного реактора с топливом низкого обогащения.

ВВЕДЕНИЕ

Реактор ИВГ.1М – исследовательский, высокотемпературный, газовый, модернизированный реактор на тепловых нейтронах с легководным замедлителем и теплоносителем и с бериллиевым отражателем нейтронов. Активная зона реактора представляет собой набор водоохлаждаемых технологических каналов (ВОТК).

Для реактора ИВГ.1М выполнена предварительная оценка возможности снижения обогащения топлива по урану-235 с 90 % до 20 %. Нейтронно-физические и теплогидравлические расчеты реактора выполнены с использованием расчетных моделей, верифицированных по параметрам реактора ИВГ.1М с топливом высокого обогащения.

Модель для нейтронно-физических расчетов разработана для работы с программным комплексом MCNP5 [1]. Для определения теплофизических характеристик построены четыре модели с помощью программного комплекса ANSYS [2].

Применение одних и тех же расчетных моделей для реактора ИВГ.1М с топливом высокого и низкого обогащения стало возможным в связи с тем, что по результатам рассмотрения вариантов конструкции активной зоны с топливом низкого обогащения предпочтение было отдано варианту с сохранением существующей конструктивно-размерной схемы реактора. Основные отличия заключались в том, что в реакторе ИВГ.1М с топливом низкого обогащения был изменен состав топливной композиции циркониевых твэлов и незначительной модернизации подверглись ВОТК и тепловыделяющая сборка (ТВС) реактора.

МОДЕЛЬ ДЛЯ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

Для расчетного исследования нейтронно-физических параметров реактора ИВГ.1М создана трехмерная модель активной зоны. При моделировании за основу была взята имеющаяся модель реактора [3]. В исходной модели основная проблема состоит в упрощенном геометрическом описании деталей ак-

тивной зоны реактора, в частности, замедлителя и отражателя.

Разработанная модель (рисунок 1) в деталях описывает конструкцию реактора, включая конструкцию ВОТК, бериллиевых блоков центральной сборки, межканальные вытеснители, боковой вытеснитель, центральный вытеснитель, конструкцию регулирующих барабанов (РБ), блоки проставок, каналы стержней компенсации реактивности (СКР) и петлевой канал [4]. Все размеры элементов соответствуют технической документации на реакторную установку, их материальный состав соответствует ГОСТ или паспортным значениям.

Активная зона реактора представляет собой набор ВОТК с ТВС. В межканальном пространстве активной зоны установлены бериллиевые вытеснители, которые охлаждаются водой. В центре реактора, расположен петлевой канал. Центральный петлевой канал реактора окружен центральным бериллиевым вытеснителем, в котором имеются каналы для СКР. Вокруг активной зоны реактора, в боковом отражателе, расположено десять РБ.

ТВС ВОТК задана гетерогенной структурой. ТВС состоит из тонкостенной цилиндрической обоймы (сплав АМг-6), торцевых проницаемых решеток (сплав АМг-5), пакета твэлов, уложенных в треугольной решетке и имеющих две зоны профилирования по радиусу. В центре ТВС расположен стержень из сплава Э110.

ВОТК первого и второго рядов набираются из двух пакетов твэлов по 600 мм снизу и 200 мм сверху. Количество твэлов в нижнем пакете составляет 468, количество твэлов в верхнем пакете 456. Пакеты разделены проницаемой торцевой решеткой толщиной 10 мм (сплав АМг-5). ВОТК третьего ряда набирается из одного пакета твэлов по 600 мм в количестве 468 твэлов. Шаг решетки твэлов 2,8 мм. Для упрощения моделирования твэлы представлены в виде цилиндров с сохранением площади сечения сердечника и оболочки твэла. Вокруг пакета твэлов расположены заполнители из сплава Э110 диаметром 2,2 мм и 1,6 мм.

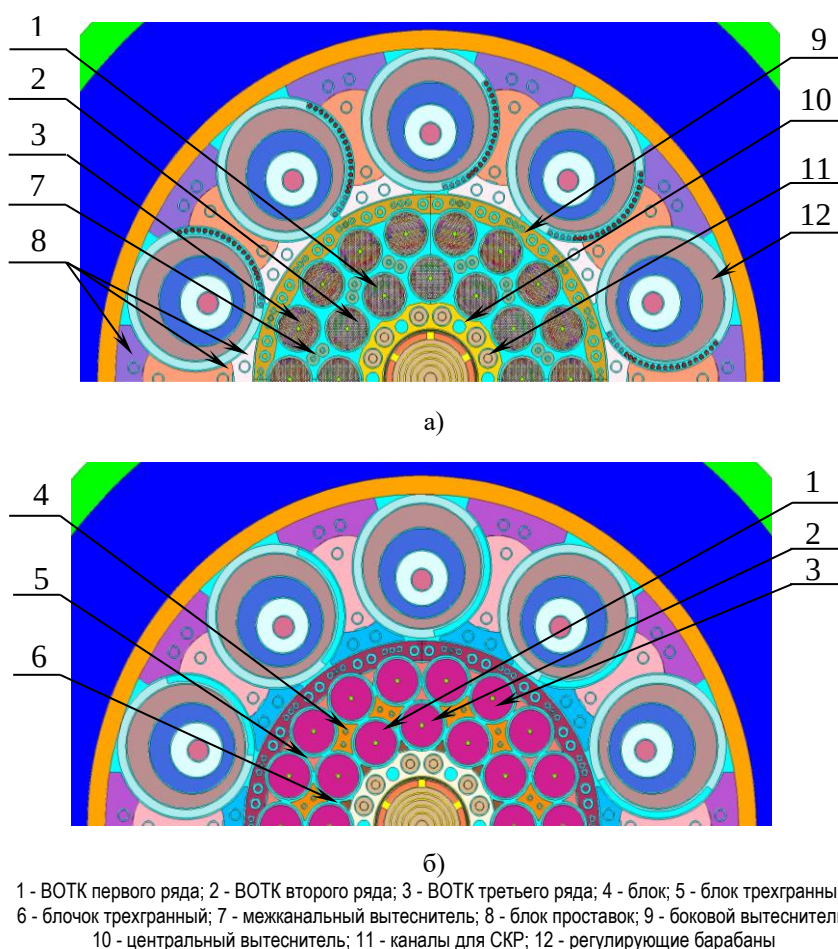


Рисунок 1. Поперечное сечение активной зоны реактора ИВГ.1М: а) уровень по высоте центра активной зоны; б) уровень по высоте -420 мм от центра активной зоны

Согласно [5], количество урана несколько различны в каждом канале. Однако при моделировании каналы каждого ряда заданы идентичными. Суммарная масса урана-235 по всем каналам составляет 4600 г.

РБ смоделированы в виде набора бериллиевых блоков, расположенных внутри друг друга и омываемых водой. По наружной стенке РБ, в секторе 112° располагаются 21 стержень (ПЭЛ – поглощающий элемент, угол между центрами крайних ПЭЛ $108^\circ 26'$), 17 из которых являются основными и 4 – дополнительными. Основные ПЭЛы смоделированы в виде трубок из сплава ТГ-702 диаметром 8 мм, длиной 196 мм и толщиной 0,4 мм. Трубки заполнены блоками из боралей. В разработанной модели барабаны можно вращать против часовой стрелки. Положение РБ (0°) соответствует развороту поглощающей части к активной зоне таким образом, что угол между вертикальной плоскостью, проведенной через центр активной зоны и центр РБ, и плоскостью, проведенной через центр РБ и центр крайнего дополнительного ПЭЛ, составляет $65^\circ 44'$. Положение

РБ (180°) соответствует развороту поглощающей части от активной зоны.

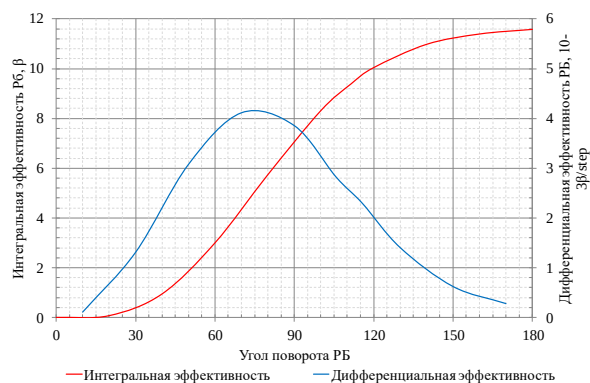
С помощью разработанной модели получены данные о распределении плотности потока тепловых нейтронов в петлевом канале, об эффективности системы РБ (рисунок 2-а), о распределении энерговыделения в активной зоне (рисунок 2-б), о выгорании топлива и накоплении продуктов деления, о влиянии разогрева реактора на его реактивность как для реактора с топливом высокого обогащения, так и для реактора с топливом низкого обогащения [4, 6]. Получены данные об эффектах реактивности при изменении температуры материалов в различных участках реактора (рисунок 2-в, 2-г).

МОДЕЛЬ ТВЭЛА ДЛЯ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ОТ ТОПЛИВА К ВОДЕ И ПАРУ

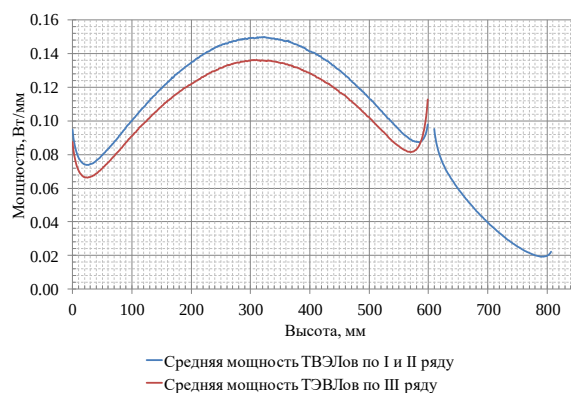
Для определения теплофизических характеристик построена модель ТВЭЛА для расчета коэффициента теплоотдачи от топлива к воде и пару. Моделируемая ячейка с ТВЭЛом представляет собой шестигранник, в центре которого имеется ТВЭЛ в виде длинной пластины (рисунок 3-а), закрученной с шагом $S=30$ мм вдоль оси в левовинтовом направлении

нии, длина рассматриваемого твэла равна 800 мм, диаметр описанной окружности твэла $D=2,8$ мм, толщина лопасти $h=1,5$ мм. В твэле присутствует топливный сердечник из уран-циркониевого сплава и

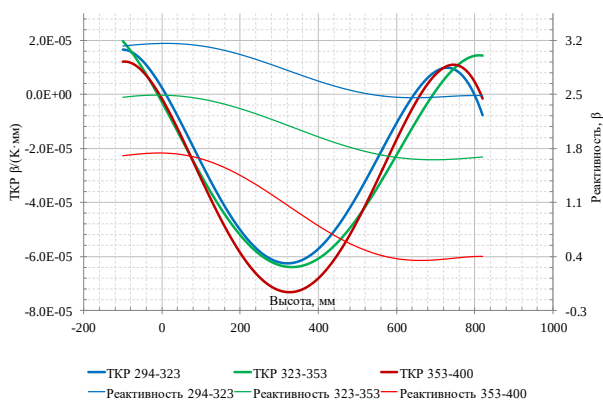
циркониевая оболочка, твэл омывается теплоносителем сверху вниз. С помощью данной модели определили коэффициент теплоотдачи в зависимости от температуры воды (рисунок 3-б) [6].



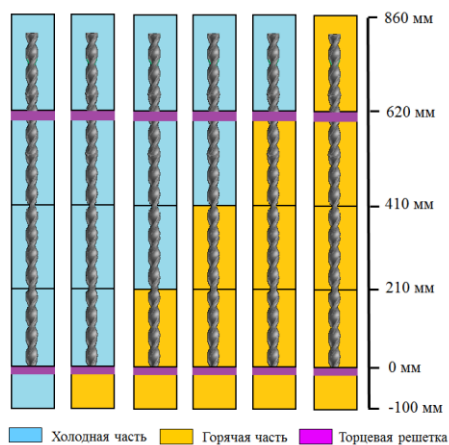
а)



б)

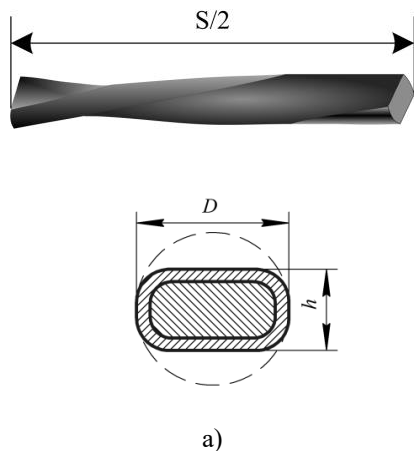


в)

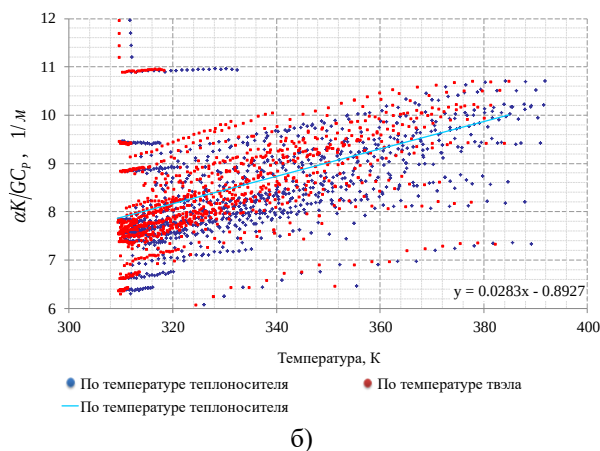


г)

Рисунок 2. Результаты нейтронно-физических расчетов: а) регулировочные характеристики системы РБ; б) распределение средней мощности по слоям твэла с шагом 1 мм при мощности реактора 1 МВт; в) зависимость эффекта реактивности при изменении температуры и плотности от высоты; г) рассчитанные варианты разделения холодного и горячего теплоносителя в ВОРК



а)



б)

Рисунок 3. Модель твэла для расчета коэффициента теплоотдачи от топлива к воде и пару: а) основные геометрические параметры твэла; б) значения коэффициента теплоотдачи $\alpha K/GC_p$

МОДЕЛЬ БОКОВОГО ОТРАЖАТЕЛЯ И ЦЕНТРАЛЬНОЙ СБОРКИ ДЛЯ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ОТ БЕРИЛЛИЕВЫХ БЛОКОВ К ВОДЕ

Основными задачами теплогидравлических расчетов являлись (рисунок 4):

- определение теплового состояния бокового отражателя и центральной сборки при установившемся режиме теплообмена между бериллием и теплоносителем на стационарном уровне мощности ТВС;
- определение характеристик выхода на стационарный режим;
- определение теплового потока и коэффициента теплоотдачи от бериллия к теплоносителю.

Для выполнения поставленных задач разработаны трехмерные модели центральной сборки и бокового отражателя.

Для расчета центральной сборки выбран сегмент 1/4 части, включающий в себя центральный вытеснитель, боковой вытеснитель и межканальный вытеснитель. По высоте модель разбита на участки разной высоты (рисунок 4-а, 4-б).

Основываясь на условиях осевой симметрии устройства, для расчета бокового отражателя выбран сегмент 1/20 части, включающей в себя 1/2 часть одного РБ и сегмент блоков проставок. По высоте модель разбита на участки разной высоты (рисунок 4-в, 4-г).

Проведены расчёты для стационарной мощности реактора 6 МВт и 9 МВт. Получено, что теплоотдача не зависит от мощности реактора в данном диапазоне.

МОДЕЛЬ КАНАЛА ВОТК ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА В МЕЖКАНАЛЬНОЕ ПРОСТРАНСТВО

Целью расчетов является определение мощности теплового потока от нисходящего горячего потока теплоносителя в канале ВОТК в восходящий холодный поток теплоносителя в межканальном пространстве [7]. Для проведения расчета по определению теплогидравлических характеристик канала построена трехмерная модель (рисунок 5).

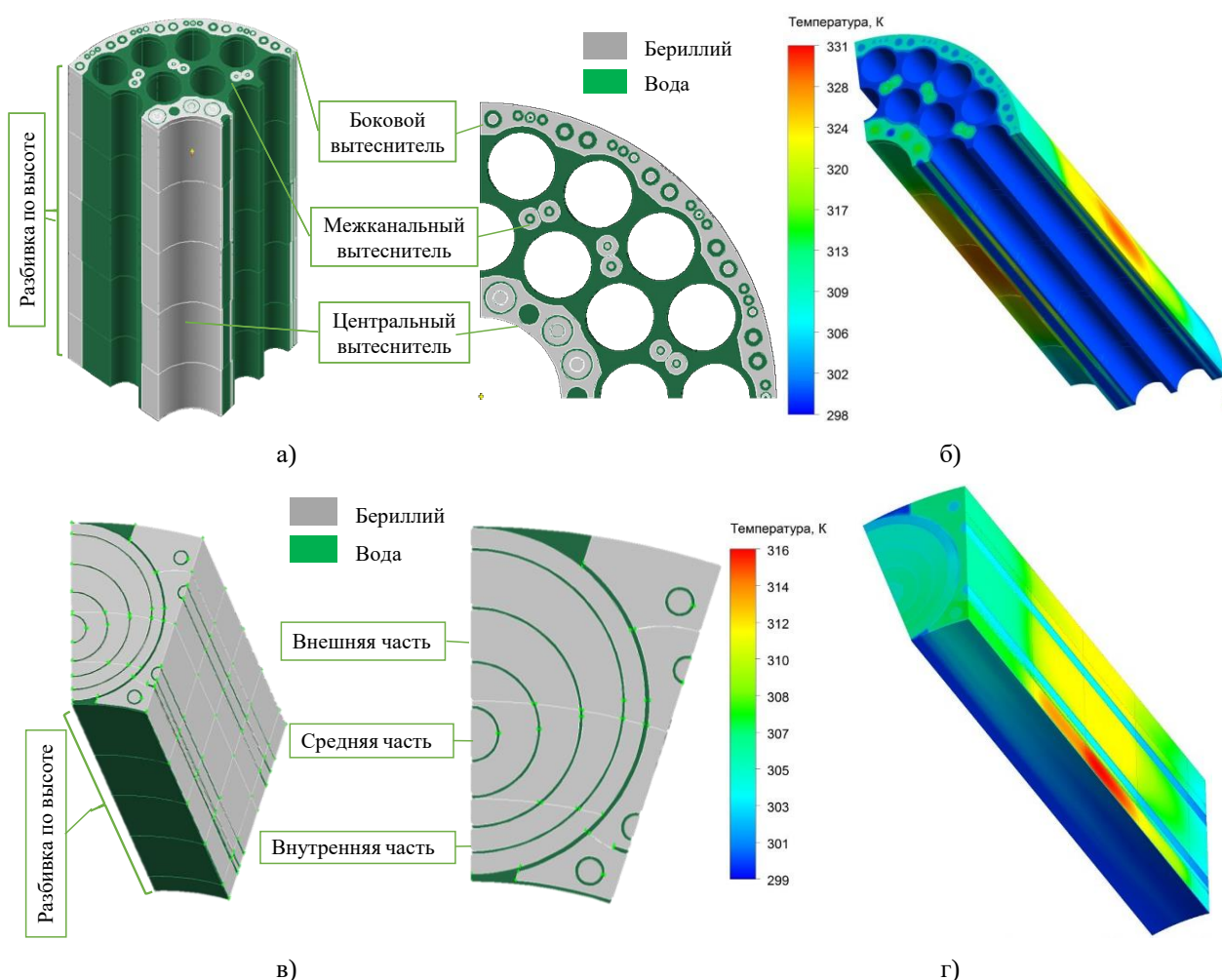


Рисунок 4. Модель бокового отражателя и центральной сборки: а) расчетная модель центральной сборки; б) распределение температуры; в) расчетная модель бокового отражателя; г) распределение температуры

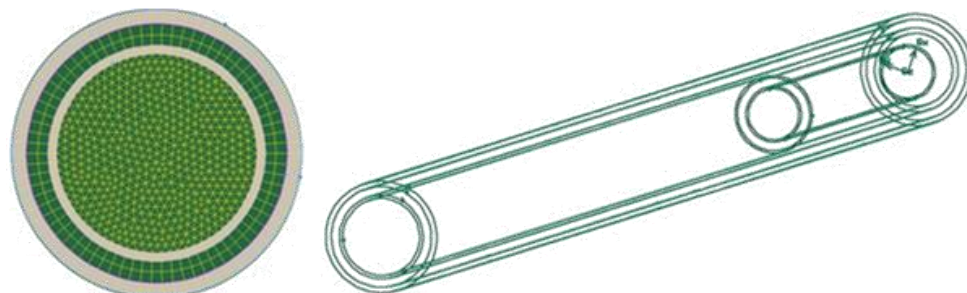


Рисунок 5. Расчетная модель канала ВОТК

Модель представляет собой канал, омываемый с двух сторон водой. Внутри канала в верхней части размещен блок высотой 800 мм с энерговыделением, равным энерговыделению в канале. Размеры блока подобраны таким образом, чтобы сохранить площадь проходного сечения теплоносителя в ВОТК. Площадь проходного сечения воды с наружной стороны равна площади воды в межканальном пространстве на один канал.

Данная модель позволяет оценить мощность теплового потока в межканальное пространство. Расчет модели проведен для стационарного режима. Температура на входе подбиралась по результатам серии расчетов. Для оценки теплового потока измерены значения среднемассовой температуры теплоносителя на выходе и на уровне под тепловыделяющей сборкой.

Тепловой поток в межканальное пространство составляет 15,3 % мощности ВОТК, из них под активной зоной передается 13,6 %. Из расчетов следует, что тепловой поток от ВОТК в межканальное пространство в активной зоне составляет приблизительно 1,7 % мощности ВОТК.

ЛИТЕРАТУРА

1. MCNP-5.1.40 Monte-Carlo N-Particle Transport Code; Los Alamos National Laboratory; Los Alamos, New Mexico. – April 24, 2003.
2. ANSYS release 14.5 Documentation for ANSYS WORKBENCH [Электронный ресурс]: ANSYS Inc. – Электрон. дан. и прогр. – [Б. м.], 2014.
3. Характеристика активной зоны реактора ИВГ.1М с высокообогащенным ураном: отчет (Deliverable 2.2 under Contract 0J-30461-0001A) / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК. рук. А.Д. Вурим, А.А. Колодешников. – Курчатов, 2011 г. – 39с.
4. Модификация модели нейтронно-физического расчета реактора ИВГ.1М / филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК. рук. А.Д. Вурим, А.А. Колодешников, В.С. Гныря. – Курчатов, 2013 г. – 22с.
5. Описание реактора ИВГ.1М: отчет инв. №37-370-01/1729 вн от 10.11.2010 / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК. рук. А.Д. Вурим, А.А. Колодешников. – Курчатов, 2010 г. – 43с.
6. Программа для расчета кинетических параметров реактора ИВГ.1М / филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК. рук. А.Д. Вурим, А.А. Колодешников, В.С. Гныря. – Курчатов, 2014 г. – 68с.
7. ИР ИВГ.1М с ВОТК-НОУ. Проверка модели кинетики реактора / филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК. рук. А.Д. Вурим, А.А. Колодешников, В.С. Гныря. – Курчатов, 2014 г. – 34с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные модели описывают реактор с точки зрения нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик. Модели верифицированы по параметрам реактора ИВГ.1М с топливом высокого обогащения.

Представленные модели предназначены для расчета таких параметров реактора ИВГ.1М как распределение мощности, плотности потока нейтронов, эффективность системы РБ, выгорание топлива и накопление продуктов деления, влияние разогрева реактора на его реактивность, температурное поле активной зоны реактора, характеристики переноса тепла в активной зоне. Также, с помощью представленных моделей оцениваются характеристики модернизированного реактора ИВГ.1М с низкообогащенным топливом.

Для проведения нейтронно-физических расчетов имеется возможность изменения топливного состава, состава конструкционных материалов, положения органов управления, температуры элементов, расхода теплоносителя и мощности реактора.

ИВГ.1М РЕАКТОРЫН МОДЕЛДЕУ

**Жагипарова Л.К., Вурим А.Д., Котов В.М., Пахниц А.В., Иркимбеков Р.А.,
Байгожина А.А., Мурзагалиева А.А., Витюк Г.А.**

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

Мақалада нейтрондық-физикалық және жылугидравликалық есептеулер үшін ИВГ.1М реакторының моделі көрсетілген. Моделдер ИВГ.1М реакторының және төмен байытылған отындары бар жаңғыртылған реакторлардың сипаттарының есептемелері үшін қолданылады.

MODELING OF IVG.1M REACTOR

**L.K. Zhagiparova, A.D. Vurim, V.M. Kotov, A.V. Pakhnits, R.A. Irkimbekov,
A.A. Baigozhina, A.A. Murzagaliyeva, G.A. Vityuk**

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

The paper presents the models of IVG.1M reactor for neutron and physical and thermohydraulic computations. The models are used for computation of characteristics of IVG.1M reactor and advanced reactor with low-enriched uranium fuel.

УДК 681.518.3

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОГО НАТРИЯ

Каражигитов Д.Б., Коровиков А.Г.

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

На экспериментальной базе НЯЦ РК проводятся вне реакторные эксперименты в обоснование конструкции активной зоны перспективного реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. При проведении экспериментов важным параметром, влияющим на безопасность экспериментов, является уровень натрия в емкостях установки. Созданная информационно-измерительная система параметров жидкого натрия позволяет контролировать с высокой точностью уровень и наличие пустот жидкого натрия в транспортной емкости. Работа содержит информацию о структуре, алгоритмах, программной реализации информационно-измерительной системы, а также о результатах проведенного эксперимента по работоспособности информационно-измерительной системы.

ВВЕДЕНИЕ

Подтверждение работоспособности технических средств исключения возможности возникновения повторной критической конфигурации топлива при тяжелой аварии с плавлением топлива активной зоны реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем является важным для решения проблем атомной безопасности. Данные полученные с помощью экспериментов позволят устранить аварийные ситуации будущих реакторов, использующих в качестве теплоносителя расплавленный металл.

В процессе проведения эксперимента происходят мгновенные реакции с расплавленным натрием, и как следствие существует необходимость регистрации, обработки и отображения уровня и наличия пустот натрия на высоких частотах.

При обработке регистрируемых параметров на высокой частоте существует проблема описания математическими моделями объекта исследования, измерительных ситуаций из-за нечеткости информации, появляющейся в условиях неопределенности при воздействии дестабилизирующих факторов. Основными дестабилизирующими факторами являются:

- дефицит информации, возникающий в результате пропуска сигнала на высокой частоте опроса;
- нестабильность частоты опроса;
- нестабильность информации, получаемая с первичных преобразователей.

Указанные проблемы, связанные с дефицитом информации, нестабильности при контроле параметров в условиях неопределенности, предлагается решать на основе алгоритмизации ИИС, позволяющих осуществлять процедуры принятия решений по выбору оптимальных режимных параметров измерений в зависимости от измерительной ситуации, оптимизацию процедур в соответствии с выбранными критериями – оперативностью и точностью измерений [1].

Таким образом, целью данной работы является создание информационно-измерительной системы параметров натриевого теплоносителя на стендовом комплексе «Eagle».

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ИИС

На начальной стадии проектирования была составлена блок-схема информационно-измерительного обеспечения ИИС (рисунок 1). Блок-схема информационно-измерительного обеспечения ИИС представляет собой последовательность действий с момента начала измерительного процесса до его завершения.

Программное обеспечение (ПО) ИИС представляет собой структуру работы алгоритмов (рисунок 2):

- взаимодействие базы данных, хранение конфигурации каналов и настройки оператора;
- модуль распознавания данных, задача которого определить данные приходящие из измерительного узла;
- модуль обработки данных, методы преобразования данных и алгоритмизация;
- модуль представления данных, табличное представление и тренды;
- модуль архивации данных, фильтрация и регистрация результатов обработки;
- модуль управления, подача аналоговых сигналов.

Структурное обеспечение ИИС состоит из трех уровней (рисунок 3). Нижний уровень включает измерительный узел, состоящий из первичных преобразователей (датчиков, сенсоров). Средний уровень включает модули-нормализаторы сигналов преобразователей (усилители, модули синхронизации), измерительную аппаратуру (контроллеры, модули аналогово-цифровых преобразователей, модули цифро-аналоговых преобразователей). Высший уровень состоит из автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора.

На основе требований к системе, составленных схем информационно-измерительного, программного обеспечения и структурного обеспечения выбрано оборудование. Структурная схема ИИС приведена на рисунке 4.

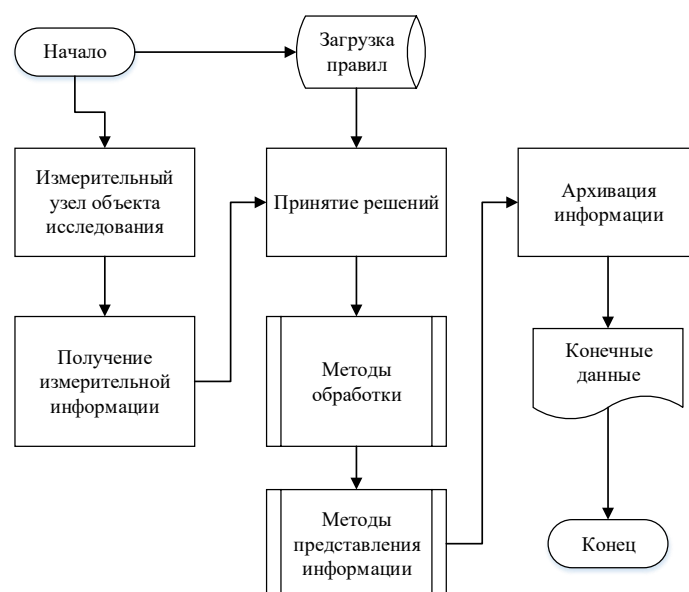


Рисунок 1. Блок-схема информационно-измерительного обеспечения ИИС

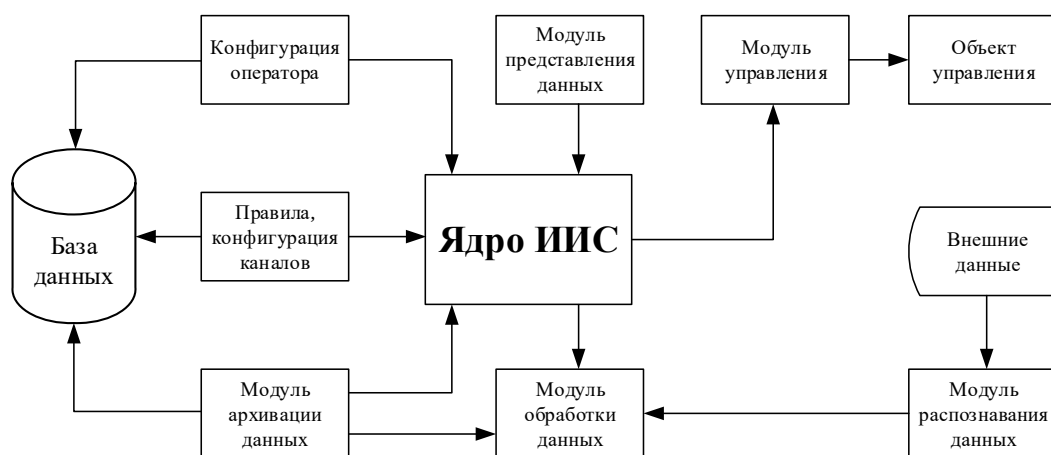


Рисунок 2. Программное обеспечение ИИС

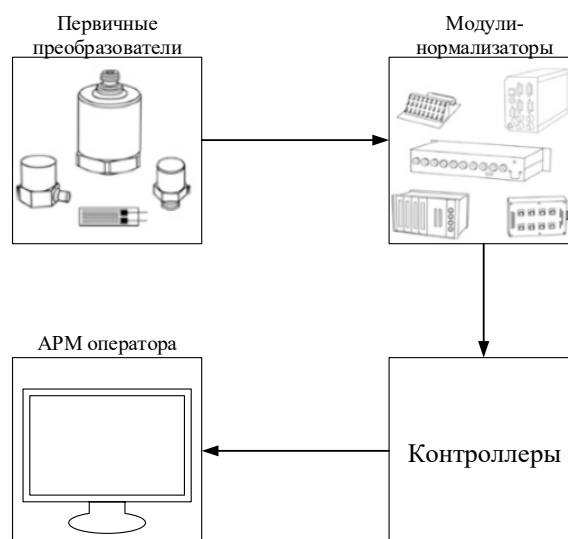


Рисунок 3. Структурное обеспечение ИИС

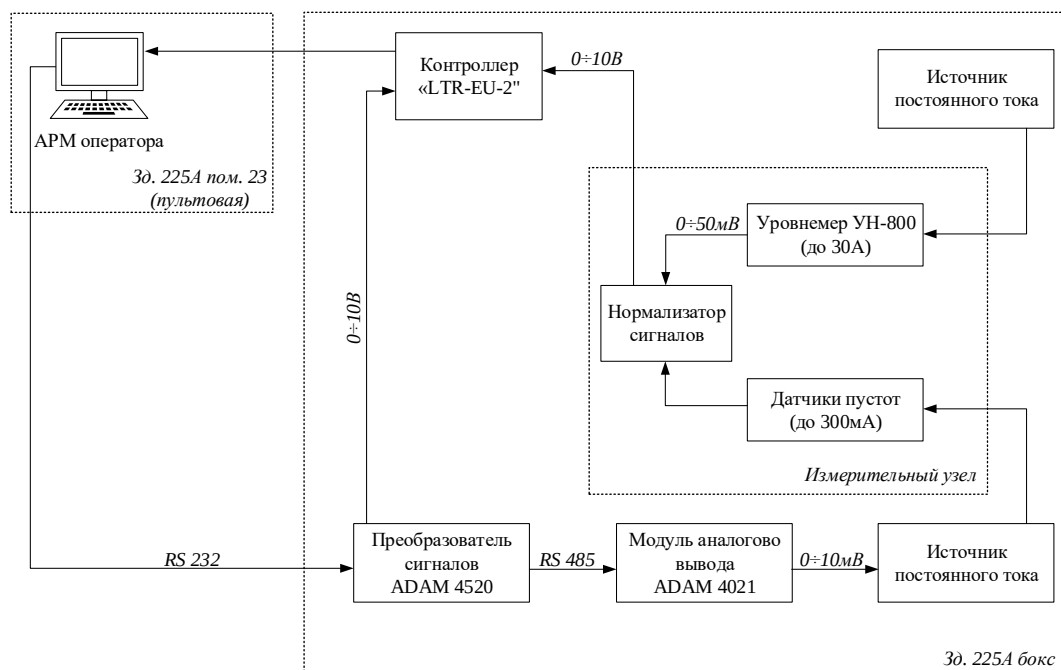


Рисунок 4. Структурная схема ИИС



Рисунок 5. Уровнемер УН-800

Измерительный узел состоит из:

- нестандартных первичных преобразователей (датчики пустот, уровнемер УН-800);
- нормализатора сигналов;
- источников постоянного тока.

Датчики пустот, предназначены для выдачи сигнала обнаружения пустоты. Действие датчика основывается на измерении изменения сопротивления на коротком отрезке тонкой трубки. Этот отрезок является чувствительным элементом. При переходе этого чувствительного элемента из жидкого металла в паровую пустоту эффективное сопротивление увеличивается от нуля до некоторого конечного сопротивления [4].

Для питания датчиков пустот и уровнемера используется источник постоянного тока со следующими техническими характеристиками:

- регулирование выходного тока в нагрузке от 0 до 1,5 А;
- управление выходными сигналами от 4 до 20 мА, от 0 до 20 мА, от 1 до 5 В и от 0 до 10 В;
- гальваническая развязка.

Нормализатор сигналов предназначен для усиления и нормирования сигнала и имеет следующие характеристики:

- диапазоны входных сигналов от 0 до 5 В, от 0 до 50 мВ, от 0 до 25 мВ и от 0 до 10 мВ;

- полоса пропускания от 0 до 5 кГц;
- гальваническая развязка;
- автономное питание (для уменьшения влияния помех связанных с питанием).

Уровнемер жидкого натрия УН-800 (рисунок 5) предназначен для измерения уровня натрия в транспортной емкости (АК.20898.01.000) на стенде «EAGLE». Диапазон измерения уровня жидкого натрия от 0 мм до 800 мм. Принцип действия датчика основан на измерении электрического сопротивления чувствительного элемента, шунтируемого измеряемой средой – жидким натрием.

В качестве модуля преобразования аналогового в цифровой сигнал выбран крейт L-Card LTR-EU-2 (рисунок 6).

Данный крейт является малогабаритным многофункциональным конфигурируемым гальваноизолированным внешним устройством с двумя интерфейсами USB 2.0 (high speed) и Fast Ethernet (100BASE-TX). Использование возможностей Ethernet-интерфейса позволяет осуществлять ввод данных практически на любом расстоянии от компьютера оператора и избавляет от необходимости применения дополнительных удаленных компьютеров. Особенностью оборудования является высокая частота опроса (до 400 кГц) на 64 канала [2].



Рисунок 6. Крейт L-Card LTR-EU-2

Для управления источниками тока датчиков пустот выбран модуль аналогового вывода ADAM-4021 (рисунок 7).



Рисунок 7. Модуль аналогового вывода ADAM-4021

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИИС

Разработка ПО была основана на следующих принципах:

- интерфейс должен быть интуитивно понятным;
- повышение эффективности работы оператора за счет простоты выполнения операций;
- уменьшение общего числа пользовательских ошибок.

В качестве разработки программного обеспечения выбран язык C# и среда разработки Visual Studio производство компании Microsoft [4], которые позволили:

- разработать программное средство реального времени;
- выполнить принципы пользовательского интерфейса;
- распределить работу пользовательского интерфейса и алгоритмы обработки данных, используя технологию асинхронного программирования;
- автоматически управлять памятью, исключать перегруженность операционной системы;
- использовать программное обеспечение на других операционных системах;
- управлять крейтом L-Card LTR-EU-2.

Пользовательский интерфейс ИИС (рисунок 8) представляет собой окно экрана оператора, настроек и управления.

Измерительные данные поступают от крейта в виде буфера (массив данных). Буфер содержит объем нераспределенной информации электрических значений. Для распределения данных был использован алгоритм, который исходя из количества каналов и количества значений буфера, циклически распределяет измерительную информацию по каналам.

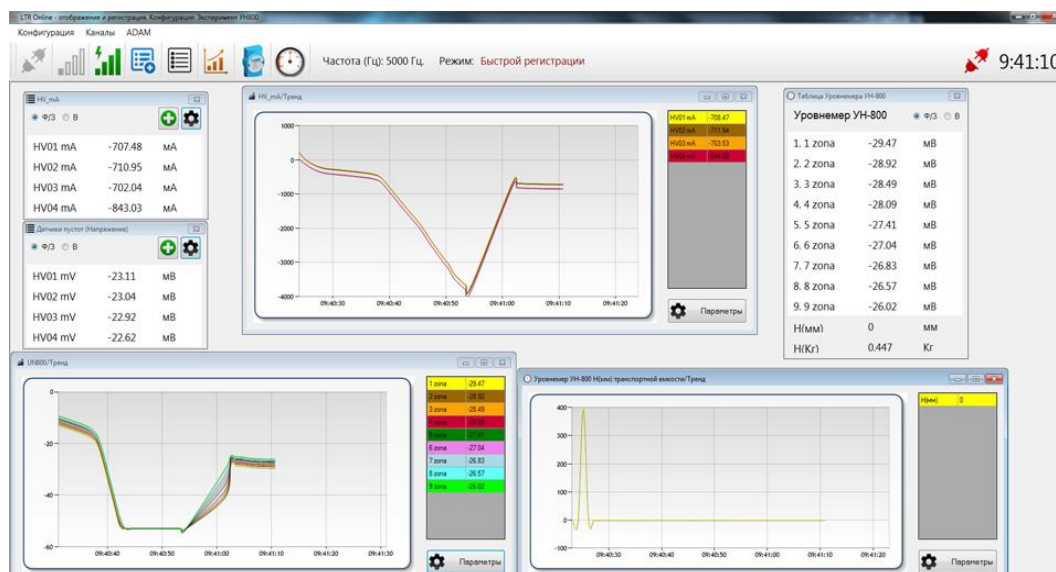


Рисунок 8. Пользовательский интерфейс ИИС

Для нестандартного преобразователя (уровнемера УН-800) создан алгоритм преобразования:

- уровнемер состоит из девяти каналов, восемь каналов для зон натрия и последний для сухой зоны;
- обход ряда условий, в результате которого вычисляется максимальное значение для диапазона электрической величины;
- пересчет в физические значения, вычисление уровня натрия, исходя из диапазона электрической величины.

Уровень жидкого натрия определяется формулой:

$$H(\text{мм}) = Y_k + L_k \left(1 - \frac{U_k}{U_{k+1}} \right),$$

где Y_k – координата начала локальных зон измерения относительно нулевого уровня;

L_k – длины локальных измерительных зон;

U_k – падение напряжения на k -той зоне измерения;

U_{k+1} – падение напряжения на сухой k -той зоне измерения.

Параметры уровнемера приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Координата начала локальных зон измерения. Точка отсчета нулевого уровня.

№ ЗОНЫ	Y_1 , мм	Y_2 , мм	Y_3 , мм	Y_4 , мм	Y_5 , мм	Y_6 , мм	Y_7 , мм	Y_8 , мм
	0	100	200	300	400	500	600	700

Таблица 2. Длины локальных измерительных зон

№ ЗОНЫ	L_1 , мм	L_2 , мм	L_3 , мм	L_4 , мм	L_5 , мм	L_6 , мм	L_7 , мм	L_8 , мм
	100	100	100	100	100	100	100	100

После распределения данных буфера, посылаемые из автономного контроллера, создается буфер физических значений. Буфер физических значений обрабатывает алгоритм архивации данных.

Крейт LTR-EU-2 обладает рядом преимуществ, таких как высокая частота опроса, управление частотой опроса, гибкая настройка контроллера. Однако в контроллере отсутствует информация о временных событиях. В качестве временных событий используется время локального АРМ оператора, считываемое время каждый раз, когда поступает буфер из измерительного узла. В конечном итоге создается локальный файл с результатами обработки.

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ИИС

Для проведения экспериментальных работ по проверке работоспособности ИИС использована следующая схема: уровнемер УН-800 установлен в крышку экспериментальной ёмкости, которая соединена трубопроводом с разделительной ёмкостью, заполненной натрием. Предварительно натрий в разделительной ёмкости равномерно нагревался до температуры 200 °С, трубопровод и экспериментальная ёмкость также нагрели до температуры 200 °С.

Затем жидкий натрий вытесняется из разделительной ёмкости в экспериментальную инертным газом давлением до двух атмосфер. Заполнение экспериментальной ёмкости выполняется снизу вверх и регулируется открытием/закрытием вентиля. Слив жидкого натрия: осуществляется сбросом давления из разделительной ёмкости и подачей давления до двух атмосфер инертного газа в экспериментальную ёмкость. Слив жидкого натрия также регулируется открытием/закрытием вентиля. Общий вид схемы эксперимента показан на рисунке 9.



Рисунок 9. Общий вид схемы эксперимента (трубопровод и экспериментальная ёмкость без теплоизоляции)

Заполнение экспериментальной ёмкости до уровня 630 мм контролировалось датчиками пустот, в количестве 4 шт., расположенных на отметках HV01 (30 мм), HV02 (230 мм), HV03 (430 мм) и HV04 (630 мм) от кончика уровнемера УН-800. Схема расположения уровнемера УН-800 и датчиков пустот в экспериментальной ёмкости приведена на рисунке 10.

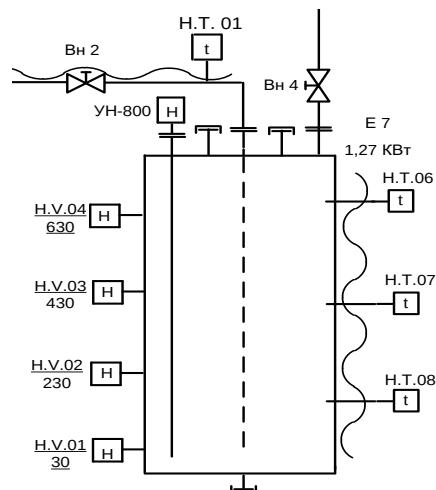


Рисунок 10. Схема расположения уровнемера УН-800 и датчиков пустот в экспериментальной ёмкости

В таблице 3 приведены исходные данные для расчета погрешности измерения уровня.

Таблица 3. Значения уровня жидкого натрия при срабатывании датчиков пустот HV02 и HV03

Наименование	Уровень натрия при срабатывании датчика пустот HV02 (отм. 230), мм	Уровень натрия при срабатывании датчика пустот HV03 (отм. 430), мм
Измерение 1	223	410
Измерение 2	220	424
Измерение 3	223	428
Измерение 4	231	432
Измерение 5	235	435
Измерение 6	233	435
Среднее арифметическое значение, мм	227,5	427,3
Среднеквадратичная погрешность, мм	6,25	9,5
Относительная погрешность, %	2,7 %	2,2 %
Приведенная погрешность, %	0,8 %	1,2 %

ЛИТЕРАТУРА

1. Селивинова, З.М. Информационно-измерительная система / З.М. Селивинова // Проектирование и технология электрон. средств – 2005. - № 2. – с. 35–37.
2. Гарманов А.В., Крейтовая система LTR. Руководство пользователя. – М.: L-Card, 2016.
3. Рихтер Д., CLR via C#. Программирование на платформе Microsoft .NET Framework 4.5 на языке C#. – 2017. – ISBN 978-5-496-00433-6, изд. 4, с. 145–643.
4. Дроздов А.В., Система измерения пустотных фракций в жидком натрии датчиками пустот. Сборник трудов молодых ученых (14-16 мая 2003 г) – Курчатов, –2003 – ISBN 9965-676-02-3, с. 252–239.

СҰЙЫҚ НАТРИЙ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ АҚПАРАТТЫҚ-ӨЛШЕУ ЖҮЙЕСІ

Каражигитов Д.Б., Коровиков А.Г.

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

Натрийлі жылутасымалдағышы бар жылдам нейтрондардағы келешектегі реактордың активті зонасының құрылғысын негіздеуде ҚР ҰАО эксперименттік базасында реактордан тыс эксперименттер жүргізілуде. Эксперименттерді жүргізу кезінде, эксперименттің қауіпсіздігіне әсер ететін маңызды параметрі болып қондырғының сиымдылығындағы натрийдің деңгейі болып табылады. Сұйық натрий параметрлерінің құрылған ақпараттық-өлшеу жүйесі транспорттық сиымдылықтағы сұйық натрийдің деңгейі мен бос қуыстарының бар болуын жоғары дәлдікпен қадағалауға мүмкіндік береді.

Жұмыста, ақпараттық-өлшеу жүйесінің құрылымы, алгоритмдері, программалық іске асыру туралы, сонымен қатар ақпараттық-өлшеу жүйесінің жұмысқа жарамдылығына жүргізілген эксперименттің нәтижелері туралы ақпараттар бар.

INFORMATION AND MEASURING SYSTEM OF LIQUID SODIUM PARAMETERS

D.B. Karazhigitov, A.G. Korovikov

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

At the experimental base of NNC RK out-of-pile experiments in justification of construction of the core of advanced reactor on fast neutrons with sodium coolant are carried out. During experiments a level of sodium in the vessels of the installation is an important parameter that influence on safety of the experiment. The developed information and measuring system of liquid sodium parameters allows monitoring the presence of voids of liquid sodium in transport tanks with high accuracy.

The paper provides the information on the structure, algorithms, software implementation of the information and measurement system, as well as on the results of the experiment on the operability of the information and measuring system.

На основании проведенных расчетов максимальная погрешность измерения составляет не более 1,2 %.

ВЫВОДЫ

В результате проделанной работы разработана информационно-измерительная система параметров жидкого натрия, удовлетворяющая требования технического задания. Выбранное оборудование позволяет проводить опрос всех датчиков с частотой 400 кГц. Разработанное ПО позволяет проводить сбор, регистрацию и отображение измеренной информации в удобной для оператора форме, а также менять частоту опроса, преобразования, регистрации, отображения данных. Проведенный калибровочный эксперимент при температуре натрия около 200 °С подтвердил работоспособность и точность системы (погрешность не более 1,2 %). Разработано руководство оператора.

Следующим этапом выполнения работ является разработка эксплуатационной документации для ввода ИИС в опытную эксплуатацию.

УДК 621.039.5

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ДЕЛЕНИЙ ЯДЕР ^{235}U НЕЙТРОНАМИ ПО ИЗМЕРЕННОЙ АКТИВНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ – ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ

Медетбеков Б.С., Алейников Ю.В., Попов Ю.А.

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

В работе представлены результаты физических исследований, проведенных для определения скорости деления ядер ^{235}U в образцах UO_2 по измеренной активности ряда радионуклидов – продуктов деления. В качестве объекта исследования были взяты образцы из UO_2 с естественным обогащением по изотопу урана ^{235}U , облученные в экспериментальном канале реактора ИВГ.1М. С применением активационного метода анализа в диоксиде урана определен ряд радионуклидов – продуктов деления, по активности которых определена скорость деления ядер ^{235}U в образце диоксида урана. Также, оценена погрешность скорости деления, которая не превысила 6 %.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее актуальных направлений прикладной ядерной физики является ядерная аналитика, представляющая собой комплекс ядерно-физических методов анализа, позволяющий изучать химические и физико-химические свойства вещества и материалов. Применение для этих целей традиционных химических методов ограничено из-за недостаточной быстроты проведения анализа и производительности анализа, отсутствия возможности автоматизации процесса анализа. Ядерно-физические методы позволяют во многих случаях заменить более трудоемкие и менее производительные методы химического анализа, а для большого числа задач применение ядерно-физических методов анализа является единственным способом их решения [1, 2].

Активация – это процесс получения радиоактивного вещества при ядерных реакциях при облучении стабильных ядер нейтронами, гамма-квантами, протонами или другими частицами. Активационный анализ относится к основным ядерно-физическим методам обнаружения и определения содержания элементов в различных природных и техногенных материалах и объектах окружающей среды

В настоящее время ядерно-физические методы анализа получили достаточно широкое применение в аналитической практике. Наиболее широкое развитие получили следующие методы анализа: активационный анализ в его различных вариантах (нейтронно-активационный, гамма-активационный и др.).

Кроме реакции (n, γ) , в НАА могут использоваться также и другие реакции, вызываемые нейтронами: (n, p) , (n, α) , (n, f) . Первые две протекают обычно на высокоэнергетических нейтронах, но для некоторых легких ядер происходят и на тепловых нейтронах. Реакция деления (n, f) используется для определения делящихся изотопов урана и плутония в природных объектах. В данной работе как раз будет идти речь о последнем.

Некоторые наиболее тяжелые ядра вследствие возрастания кулоновского отталкивания протонов в них оказываются энергетически неустойчивыми и

способными к самопроизвольному или происходящему под воздействием ядерного облучения делению на два осколка. При облучении ядер тепловыми и медленными нейтронами реакция (n, f) наблюдается только на ядрах ^{235}U и ^{233}U . Под действием быстрых нейтронов число ядер, испытывающих деление, увеличивается за счет изотопов урана и тория (^{238}U и ^{232}Th). Осколки, образующиеся при делении этих ядер, являются изотопами многих элементов, находящихся в середине периодической системы примерно от Zn до Gd.

Настоящая работа посвящена исследованиям по определению активности ПД, числа делений ядер ^{235}U , а также погрешности определения активности ПД в облученном ядерном топливе активационным методом.

1 ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**1.1 Физические исследования с образцом диоксида урана**

В данной работе рассмотрена реализация расчетно-экспериментального метода определения числа делений ядер изотопа урана ^{235}U по измеренной активности радиоизотопов – ПД после работы реактора на постоянном уровне мощности и после выдержки t .

Целью физических исследований являлось получение экспериментальных данных по определению числа делений ядер ^{235}U в образце UO_2 , облученного в ФКЭ реактора ИВГ.1М. Физические исследования включали в себя:

- подготовку образца к облучению;
- проведение реакторного эксперимента с ЭУ;
- постреакторные исследования, включающие гамма-спектрометрические измерения спектров излучения от облученного образца с последующей обработкой результатов измерений.

Эксперимент проводился с использованием размещенного в ФКЭ ЭУ, представляющего собой полиэтиленовый контейнер с образцом UO_2 . Образец находился на уровне центра активной зоны реактора (на расстоянии 1800 мм от верхнего торца ФКЭ).

Порошкообразный образец был приготовлен из фрагмента измельченной в ступке топливной таблетки из UO_2 с обогащением 0,72 % по изотопу урана ^{235}U . Масса образца составила 34 мг, размер в плане – 9×9 мм.

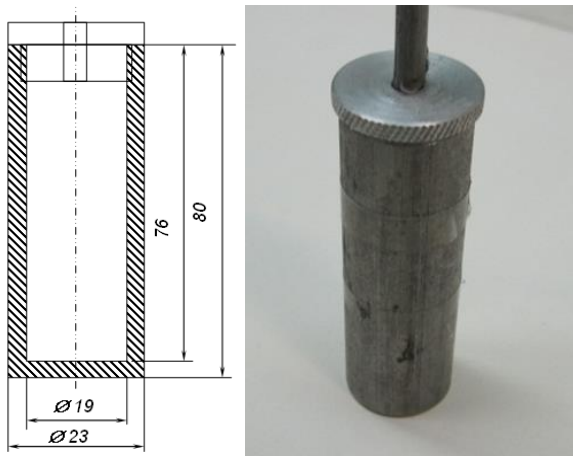


Рисунок 1. Конструктивная схема контейнера для облучения образцов

2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ДЕЛЕНИЙ ЯДЕР ^{235}U

2.1 Расчет удельной активности ^{235}U

Удельная активность (на 1 г урана), приведенная на момент окончания облучения, рассчитывалась по формуле

$$A_{0i}' = \frac{S_i}{t_{\text{ж}} \cdot p \cdot \varepsilon} \cdot \frac{\lambda \cdot t_R}{(1 - e^{-\lambda t_R})} \cdot \frac{1}{m}, \quad (1)$$

где m – масса урана в образце, г;

$S_i(E)$ – площадь ППП с энергией E ;

λ – постоянная распада продукта реакции, с^{-1} ;

p – выход гамма-квантов;

ε – эффективность регистрации гамма-квантов;

t_R – текущее время измерения, с;

$t_{\text{ж}}$ – «живое» время измерения, с.

2.2 Анализ схем распада ПД

Сведения о структуре изобарных цепочек и генетических связей между ядрами при нейтронном облучении получены на основании анализа данных, приведенных в [5,6].

В качестве абсолютного независимого выхода родоначальника цепочки используется его кумулятивный выход, включающий в себя абсолютный выход его неидентифицированных предшественников. При наличии у ядра изомеров, абсолютный независимый выход делится поровну (при отсутствии других рекомендаций).

Для ПД в источнике [6] по сравнению с работами [5, 7] дополнения заключаются в большем числе идентифицированных нуклидов, а так же в качественном и количественном уточнении коэффициентов ветвления, периодов полураспада, изомерных состояний и др.

2.3 Упрощение схем распада ПД

Аналитические выражения, описывающие накопление активности ПД в случае, когда изобарная цепочка состоит из четырех или пяти членов, имеют довольно громоздкий вид. На практике такие выражения для определения активности ПД или для решения обратной задачи – определения числа делений тяжелых ядер по измеренной активности ПД могут быть упрощены. Зачастую представляется возможным уменьшить число членов изобарной цепочки за счет сокращения первых короткоживущих членов, имеющих более короткие периоды полураспада при условии

$$T_{1/2}(1) \ll T_{1/2}(a), T_{1/2}(2) \ll T_{1/2}(a) \dots T_{1/2}(i) \ll T_{1/2}(a),$$

где индексы (1, 2, ..., i) соответствуют первым i отбрасываемым членам изобарной цепочки;

индекс (a) соответствует первому относительно долгоживущему ПД – аналитическому члену изобарной цепочки.

На практике количество членов цепочки сокращается до одного или двух членов. В качестве абсолютного независимого выхода родоначальника модифицированной цепочки используется его кумулятивный выход, включающий в себя абсолютные выходы его предшественников. Для второго члена цепочки используется его независимый выход.

Рассмотрим наиболее распространенный случай, когда $p(t) = p_0 = \text{const}$. Применительно к реактору это означает постоянство тепловой мощности.

$$A_1(t_0, 0) = p y_1 (1 - e^{-\lambda_1 t_0}); \quad (2)$$

$$A_2(t_0, 0) = p(y_1 + y_2)(1 - e^{-\lambda_2 t_0}) + p y_1 \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_2 t_0} - e^{-\lambda_1 t_0}). \quad (3)$$

Если процесс деления ядер прекратился, ($p = 0$), т.е. реактор остановлен, то формулы для расчета удельных активностей членов изобарной цепочки в процессе выдержки t после предшествующего облучения в течение времени t_0 имеют вид

$$A_1(t_0, t) = A_1(t_0, 0) e^{-\lambda_1 t}, \quad (4)$$

$$A_2(t_0, t) = A_1 \frac{\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + A_2(t_0, 0) e^{-\lambda_2 t}. \quad (5)$$

Здесь $A_1(t_0, 0)$ и $A_2(t_0, 0)$ выражаются через уравнения (2) и (3) соответственно.

Из (2), (3), (4) и (5) получаем аналитические выражения для расчета удельной (на грамм урана) скорости деления. Выражение для определения скорости деления по измеренной активности первого члена изобарной цепочки имеет простой вид

$$p = A_1(t_0, t) / (y_1 (1 - e^{-\lambda_1 t_0}) e^{-\lambda_1 t}). \quad (6)$$

В случае определения скорости деления по измеренной активности второго члена изобарной цепочки аналитическое выражение имеет более громоздкий вид

$$p = A_2(t_0, 0) / \left[y_1 \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) (1 - e^{-\lambda_1 t_0}) + \right. \\ \left. + \left[(y_1 + y_2)(1 - e^{-\lambda_2 t_0}) + y_1 \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_2 t_0} - e^{-\lambda_1 t_0}) \right] e^{-\lambda_2 t} \right]. \quad (7)$$

Для случая, когда $\lambda_2 t$ близко к единице и $y_1 \gg y_2$, вторым слагаемым в уравнении (6) можно пренебречь и выражение (7) можно упростить

$$p = A_2(t_0, 0) / \left[y_1 \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}) (1 - e^{-\lambda_1 t}) \right]. \quad (8)$$

Например, дополнительная погрешность в определении скорости деления ядер изотопов урана по активности ПД ^{140}La , возникающая в результате упрощения, не превысит 0,8 %, когда $\lambda_2 t = 1$. Для случая, когда $\lambda_2 t > 2$ аналогичная ошибка не превысит 0,2 %.

Исходя из анализа схем распада и измеренных спектров излучения облученного урана, выделяют изобарные цепочки, которые можно упростить до одного, относительно долгоживущего аналитического члена изобарной цепочки. При этом предшественниками этого изотопа являются относительно короткоживущие ПД. Расчет скорости делений урана проводится исходя из активности этого аналитического радионуклида по формуле (6). В случае определения активности дочернего радионуклида-ПД, предшественником которого является генетически связанный относительно долгоживущий материнский радионуклид, скорость деления определяется по формуле (7) или (8).

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Измерения, обработка и анализ спектров

Облучение образца UO_2 было проведено на пуске реактора ИВГ.1М при средней мощности 10 кВт, среднее время облучения составило 2000 с. Активность образца измерялась на протяжении 22 суток.

На рисунке 2 представлен пример гамма-спектра излучения от образца UO_2 при измерениях через 6 сут. после окончания облучения.

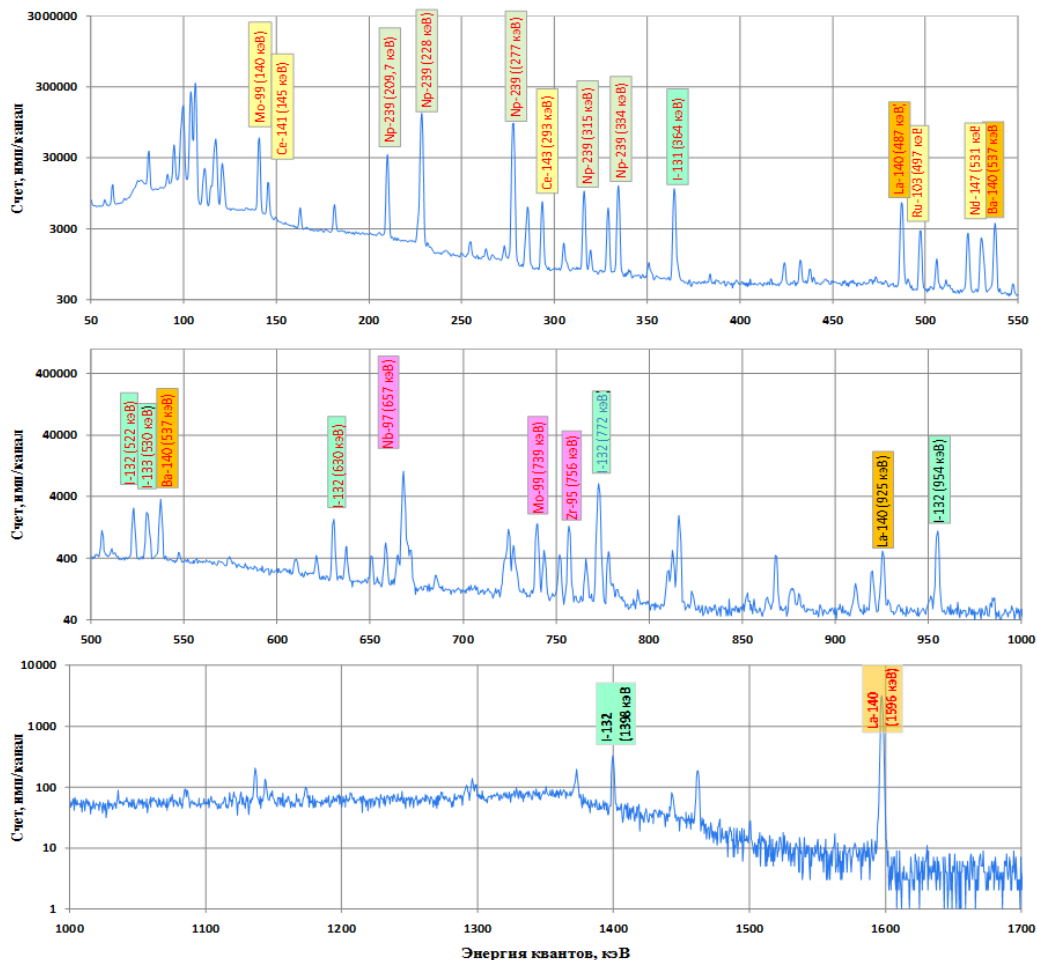


Рисунок 2. Спектр гамма-излучения от облученного образца UO_2

В спектрах наблюдается большое количество интерферирующих пиков в области от 0,1 до 1,5 МэВ. Для разрешения мультиплетов в этой области было использовано специализированное программное обеспечение – программа IPF (программа подгонки интерферирующих пиков) из набора программ GENIE PC. Как видно, на спектре имеются и хорошо разрешимые синглеты таких ПД, как Ru, I, La. Именно эти линии ПД могут быть использованы для определения скорости и числа делений ^{235}U .

После анализа спектров были определены ПД, имеющие наиболее интенсивные гамма-линии. Одним из обязательных условий при выборе удобных аналитических ПД является представительность их гамма-линий в спектрах при выдержках образца более пяти суток. При такой выдержке значительно спадает суммарная интенсивность излучения за счет распада короткоживущих ПД. Для дальнейшего анализа были выбраны следующие радионуклиды – ПД: ^{95}Zr , ^{103}Ru , ^{131}I , ^{140}Ba , ^{140}La , ^{141}Ce . В таблице 1

приведены ядерно-физические характеристики радионуклидов – ПД [4].

Расчет активности после выдержки облученного образца показал, что искомая погрешность определения активности (числа делений в случае решения обратной задачи) составляет для всех исследуемых радионуклидов – ПД, кроме ^{131}I , менее 0,1 %.

Для большинства цепочек отличие расчетных активностей аналитического радионуклида, полученных в результате расчетов модифицированной «короткой» и полной цепочек наблюдается только в пятом знаке и, таким образом, дополнительная погрешность определения активности ПД, возникающая за счет сокращения числа членов изобарных цепочек составляет не более 0,02 %. Только для ^{131}I искомая погрешность не превышает 0,37 %. Результаты определения активности и скорости деления для ряда анализируемых радионуклидов – ПД приведены в таблице 2.

Таблица 1. Ядерно-физические характеристики радионуклидов – ПД

ПД	Энергия квантов, кэВ	Выход, квант/распад	Период полураспада	Выход ПД, %	Временной коэффициент
^{95}Zr	723,98	0,44	64,019 сут	6,51	$F_1^*)$
	756,4	0,545			
^{103}Ru	496,88	0,91	39,259 сут	3,04	F_1
^{131}I	364,35	0,812	8,0399 сут	2,89	- // -
^{132}I	667,45	0,987	2,2999 ч	4,30	$F_2^{**})$
	772,43	0,762			
^{140}Ba	537,07	0,2439	12,751 сут	6,29	- // -
^{140}La	537,07	0,2439	12,751 сут	$5,45 \cdot 10^{-3}$	F_2
	537,07	0,2439			
^{141}Ce	145,64	0,482	32,5 сут	5,84	F_1

$^*) - F_1(t) = \exp(-\lambda t)$, где λ – постоянная распада ПД;

$^{**}) - F_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} [\exp(-\lambda_2 t) - \exp(-\lambda_1 t)]$, где λ_1 – постоянная распада предшественника ПД в изобарной цепочке (материнский радионуклид), λ_2 – постоянная распада ПД (дочерний радионуклид).

Таблица 2. Результаты определения активности и скорости деления ($t = 6,175$ сут, $t_{\text{жс}} = 6000$ с)

Нуклид	Период полураспада, $T_{1/2}$	Энергия квантов, кэВ	Выход, квант/распад	$S_{\text{имп}}$, имп	δS , %	Активность $A(t)$, Бк	Скорость ρ , дел/с/г(U)
^{95}Zr	64,01 сут	724,19	0,4415	$4,00 \cdot 10^3$	5,0	$1,16 \cdot 10^3$	$2,53 \cdot 10^9$
		756,72	0,545	$3,98 \cdot 10^3$	1,7	$9,66 \cdot 10^2$	$2,12 \cdot 10^9$
^{103}Ru	39,25 сут	497,08	0,91	$7,66 \cdot 10^3$	1,3	$7,59 \cdot 10^2$	$2,28 \cdot 10^9$
^{131}I	8,039 сут	364,47	0,812	$2,90 \cdot 10^4$	0,6	$2,42 \cdot 10^3$	$2,39 \cdot 10^9$
		636,96	0,0727	$1,51 \cdot 10^3$	3,3	$2,36 \cdot 10^3$	$2,34 \cdot 10^9$
^{140}Ba	12,75 сут	162,67	0,0621	$6,57 \cdot 10^3$	2,4	$3,24 \cdot 10^3$	$1,92 \cdot 10^9$
		537,3	0,2439	$9,36 \cdot 10^3$	2,8	$3,73 \cdot 10^3$	$2,21 \cdot 10^9$
^{140}La	1,678 сут	487,01	0,443	$2,02 \cdot 10^4$	0,7	$4,04 \cdot 10^3$	$2,32 \cdot 10^9$
		1596,19	0,954	$1,31 \cdot 10^4$	1,4	$3,95 \cdot 10^3$	$2,27 \cdot 10^9$
^{141}Ce	32,5 сут	145,44	0,482	$2,59 \cdot 10^4$	1,0	$1,54 \cdot 10^3$	$2,04 \cdot 10^9$
^{143}Ce	1,375 сут	57,36	0,116	$2,89 \cdot 10^3$	5,7	$1,75 \cdot 10^3$	$1,92 \cdot 10^9$
		293,26	0,428	$1,68 \cdot 10^4$	0,9	$2,10 \cdot 10^3$	$2,30 \cdot 10^9$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены физические исследования по определению скорости (числа) делений ядер ^{235}U в образце диоксида урана, облученного в ФКЭ реактора ИВГ.1М. Определен ряд радионуклидов – ПД, по активности которых возможно определение удельного числа делений в ядерных материалах. Для дальнейшего анализа были выбраны девять радионуклидов – ПД: ^{95}Zr , ^{103}Ru , ^{131}I , ^{140}Ba , ^{140}La , ^{141}Ce , ^{143}Ce . Как видно из результатов эксперимента, погрешность определения площади ППП для большинства анализируемых радионуклидов-ПД состав-

ляет не более 3 %. ^{140}La был выбран в качестве реперного радионуклида, так как традиционно по нему определялось число делений ^{235}U . Расхождения результатов определения числа делений для отдельных радионуклидов – ПД в сравнении с ^{140}La лежат в пределах от 0,4 % до 10 %.

Полученные экспериментальные данные будут использованы при разработке методики определения удельного числа делений в образцах ядерных материалов, облученных в реакторах ИГР и ИВГ.1М.

ЛИТЕРАТУРА

1. Варварица, В.П. Состояние и перспективы развития ядерно-физических методов анализа / В.П. Варварица, А.С. Штань // ВАНТ. Сер. Техническая физика и автоматизация. – 2010. – Вып. 64-65. – 28–49 с.
2. Якубович, А.Л. Ядерно-физические методы анализа и контроля качества минерального сырья / А.Л. Якубович, В.К. Рябкин. – М.: ВИМС, 2007. – 206 с.
3. Программа расчета радиационных характеристик «PHDOSE»: описание программы: АК.65000.00.787-01 13 ЛУ / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК. – Курчатов, 2000. – 15 с.
4. Схема распада радионуклидов. Энергия и интенсивность излучения: публикация 38 МКРЗ. в 2-х ч. / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
5. Радиационные характеристики продуктов деления: справочник / Н.Г. Гусев, П.М. Рубцов, В.В. Коваленко, В.М. Колобашкин. – М.: Атомиздат, 1974. – 224 с.
6. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива: справочник / В.М. Колобашкин, П.М. Рубцов, П.А. Ружанский [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 384 с.
7. Гусев, Н.Г. Радиоактивные цепочки / Н.Г. Гусев, П.П. Дмитриев. – М.: Атомиздат, 1978.

РАДИОНУКЛИДТЕР – БӨЛІНУ ӨНІМДЕРІНІҢ АКТИВТІГІН ӨЛШЕУ БОЙЫНША НЕЙТРОНДАРЫМЕН ӨЛШЕНГЕН ^{235}U ЯДРОЛАРДЫҢ БӨЛІНУ САНЫН ЕСЕПТІК – ЭКСПЕРИМЕНТТІК АНЫҚТАУ

Медетбеков Б.С., Алейников Ю.В., Попов Ю.А.

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

Мақалада физикалық зерттеу нәтижелері ұсынылған, яғни UO_2 үлгілеріндегі ^{235}U уран ядросының бөліну жылдамдығын бөліну болшектерінің активтілігі арқылы анықтау тәсілі көрсетілген. Зерттеу объектісі ретінде уран диоксиді (UO_2) үлгілері таңдап алынды. Бұл үлгілерде ^{235}U ураны бойынша байыту молшері табиғи деңгейде алынып ИВГ.1М реакторының эксперименттік каналында сәулеленді. Активациялық тәсілді қолдану арқылы уран диоксидінде бөліну болшектерінен шыққан радионуклидтердің тізімі анықталып, олардың активтілігі арқылы ^{235}U уран ядросының бөліну жылдамдығы анықталды. Және де, бөліну жылдамдығы анықтаудың қателіктері есептеліп оның орташа мәні 6 пайыздан аспады.

EXPERIMENT-CALCULATED INVESTIGATIONS FOR THE DETERMINATION OF THE FISSION RATE OF NUCLEI ^{235}U BY THE MEASURED ACTIVITY OF RADIONUCLIDES – FISSION PRODUCTS

B.S. Medetbekov, Yu.V. Aleynikov, Yu.A. Popov

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

The paper presents the results of a reactor experiment conducted to determine the rate of fissions of ^{235}U nuclei in UO_2 samples from the measured activity of a number of radionuclides-fission products. As the subject of the study samples from UO_2 with natural enrichment in uranium isotope ^{235}U , which were irradiated in the experimental channel of the IVG.1M reactor.

Using the activation method of analysis, a number of radionuclides – fission products in the uranium dioxide were determined, by the activity of which the fission rate ^{235}U nuclei in the sample UO_2 was determined. Also, the error in the fission rate was estimated, which did not exceed 6 %.

УДК 681.2.082

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОЗОННОГО УРОВНЕМЕРА КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ЖИДКОГО НАТРИЯ

Тарасенко Е.В., Райханов М.Б., Сарсембаев Е.А.

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

В работе описан многозонный уровнемер кондуктометрического типа, предназначенный для измерения уровня жидкого натрия в экспериментальных емкостях при проведении внутриреакторных и вне реакторных экспериментов с жидким натрием. Рассмотрена конструкция многозонного датчика уровня, алгоритм обработки полученных данных с уровнемера для пересчета их в уровень жидкого натрия, а также измерительная система уровнемера. Содержит результаты проведенных экспериментов и сравнение показаний уровнемера с показаниями датчиков пустот при температуре жидкого натрия 200 °С.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время жидкий натрий широко используется в атомной энергетике в качестве теплоносителя для реакторов на быстрых нейтронах типа БН, что связано с преимуществами физико-химических свойств натрия по сравнению с другими теплоносителями. В то же время активно проводятся лабораторные испытания и исследования с жидким натрием, для обеспечения безопасности при тяжелых авариях на быстрых натриевых реакторах [1, 2]. При выполнении подобных работ требуется обеспечить измерения параметров жидкого натрия, таких как температура, давление, скорость перемещения и уровень заполнения ёмкости.

Целью данной работы является разработка уровнемера жидкого натрия в рамках подготовки реакторных и вне реакторных экспериментов на экспериментальных установках с жидким натрием.

Особенностью данной задачи является сложность регистрации уровня жидкого натрия в условиях высокой температуры, агрессивной среды, невозможности визуализации процесса, ограничение в габаритных размерах уровнемера из-за малых размеров экспериментальной емкости и компоновки экспериментальной установки в целом, а при реакторных экспериментах – высокие дозовые и нейтронные нагрузки. Таким образом, широко применяемые серийные уровнемеры [3, 6], из-за технологических и конструктивных особенностей не отвечают поставленным требованиям.

Для решения данной задачи был выбран кондуктометрический тип измерения уровня жидкого натрия, с размещением уровнемера жидкого натрия в крышке (в верхней части) экспериментальной ёмкости. Выбор кондуктометрического типа измерения уровня жидкого натрия обусловлен электропроводностью жидкого натрия, которая составляет приблизительно $0,6 \times 10^7$ См/м [4] и положительным опытом работы данного типа уровнемера на экспериментальных стендах филиала ИАЭ. Однако, уровнемеры, используемые на экспериментальных стендах филиала ИАЭ, работают только при условии их установки в днище экспериментальной емкости, что

требует обеспечить надежность емкости от протечки натрия путем вваривания уровнемера в корпус экспериментальной емкости или при помощи сальниковой набивки. Такой вариант размещения датчика уровня сложен при монтаже, а в случае необходимости демонтажа датчика (очистка экспериментальной емкости, проверка работоспособности или замена вышедшего из строя уровнемера) требует приложить немало усилий для его извлечения из емкости и как следствие к возможному разрушению датчика и повреждению экспериментальной емкости, что неприемлемо. Также существует вероятность течи натрия через трещины в уровнемере, сварном шве или сальниковой набивке между уровнемером и емкостью.

Таким образом, было решено усовершенствовать конструкцию уровнемера путем установки его в крышке экспериментальной емкости, что дает следующие преимущества: удобный монтаж и демонтаж датчика уровня через фланцевое соединение в крышке, удобный доступ для подключения измерительных линий и силовых кабелей, не нарушается целостность экспериментальной емкости, а, следовательно, и уменьшается вероятность течи натрия.

1 ОПИСАНИЕ И ПРИНЦИП РАБОТЫ МНОГОЗОННОГО УРОВНЕМЕРА УН-800

Принцип действия многозонного уровнемера УН-800 основан на измерении электрического сопротивления чувствительного элемента, шунтируемого измеряемой средой – жидким натрием. В уровнемере УН-800 предусмотрена гальваническая развязка от корпуса ёмкости через паронитовую прокладку, что обеспечивает возможность измерения жидкого натрия через верхнюю часть ёмкости. В таблице 1 приведены основные технические характеристики уровнемера УН-800.

Структурная схема датчика уровнемера УН-800 приведена на рисунке 1. Первичный измерительный преобразователь уровня выполнен в виде трубы (поз. 2) из нержавеющей стали 12Х18Н10Т диаметром 14 мм и толщиной 2 мм с заглушкой (поз. 1). Труба разбита на 9 участков – зон измерения, каждая зона длиной по 100 мм. На границах зон, начи-

ная от нулевого уровня до максимального измеряемого уровня, приварены 10 измерительных электродов (поз. 6). Измерительные электроды – это провода из нержавеющей стали (12Х18Н10Т, Ø1 мм) покрытые термостойкой электроизоляцией (алундом). Измерительные электроды разделяют уровнемер на восемь зон и служат для измерения падения напряжения на зонах. Электропитание на датчик подводится по внутреннему токовводу (поз. 4) и к корпусу уровнемера (поз. 5) от источника постоянного тока. Внутренний токоввод выполнен из медного провода, который приварен к заглушке (поз. 1). Для герметизации датчика уровня при установке в ёмкость предусмотрен фланец, который выполнен единой конструкцией с чувствительным элементом уровнемера (поз. 3).

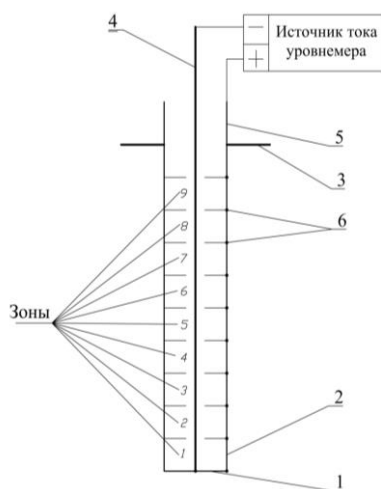


Рисунок 1. Структурная схема уровнемера УН-800

На рисунке 2 показан общий вид уровнемера УН-800. Начальными координатами уровня жидкого натрия является начало первой зоны, фактически место расположения первого электрода.



Рисунок 2. Общий вид уровнемера УН-800

Таблица 1. Основные технические характеристики уровнемера УН-800

Наименование	Значения
Диапазон измерения, мм	от 0 до 800
Количество электродов, шт	10
Количество зон измерения, шт	9
Длина каждой зоны измерения, мм	100
Диаметр электродов, мм	1
Внешний диаметр уровнемера, мм	14
Внутренний диаметр уровнемера, мм	10
Материал уровнемера и электродов	сталь, 12Х18Н10Т
Рабочая среда	жидкий натрий
Номинальная температура рабочей среды, °С	100—350

Пропуская ток порядка 20–30 А через первичный преобразователь (труба диаметром 14 мм) и измеряя падение напряжения на зонах определяется уровень жидкого натрия по формуле:

$$H(\text{мм}) = Y_k + L_k \left(1 - \frac{U_k}{U_{k+1}} \right),$$

где Y_k – координата начала зон измерения относительно нулевого уровня;

L_k – длина измерительных зон;

U_k – падение напряжения на k -той зоне измерения (где находится жидкий натрий);

U_{k+1} – падение напряжения на сухой k -той зоне измерения (без натрия).

Без жидкого натрия падение напряжения на всех измерительных зонах будет одинаково. При погружении измерительной зоны в жидкий натрий падение напряжения будет уменьшаться, а при полном погружении будет равно нулю.

Многозонность уровнемера УН-800, т.е. отношение сигналов с измерительных зон, где находится и отсутствует жидкий натрий обеспечивает независимость показаний от изменений температуры жидкого натрия и изменений величины тока на источнике питания.

2 ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОГО НАТРИЯ

Для регистрации рабочих сигналов уровнемера УН-800 и контроля уровня в экспериментальной емкости с жидким натрием, разогретым до 200 °С, была разработана и собрана локальная система регистрации параметров жидкого натрия. Данная измерительная система включает в себя следующее оборудование: датчики пустот (3 шт.); уровнемер уровня жидкого натрия УН-800; пульт управления локальной системой регистрации (компьютер) и панель с блоками ADAM для управления источниками тока датчиков пустот; блоки с нормирующими усилителями и источниками тока, портативный крейт L-CARD LTR-EU-2 с модулем LTR-11 для оцифровки сигналов с частотой до 10 Гц. На рисунке 3 показана фотография локальной системы измерения параметров жидкого натрия в сборе.



Рисунок 3. Локальная система измерения параметров жидкого натрия в сборе

3 НАСТРОЙКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УРОВНЕМЕРА УН-800

Проведение экспериментальных работ по проверке работоспособности уровнемера УН-800 проводилась в два этапа. На первом этапе проводилась настройка уровнемера УН-800 и всей измерительной системы уровнемера без натрия, так называемая «сухая» настройка уровнемера. На втором этапе уровнемер испытывается в экспериментальной ёмкости с жидким натрием.

Суть метода «сухой» настройки уровнемера заключается в следующем: положительный потенциал от источника питания постоянного тока необходимо надёжно соединить с корпусом уровнемера в верхней его части для чего на корпусе уровнемера приварена специальная клемма между фланцем и выводом измерительных электродов, а отрицательный потенциал от источника питания необходимо перемещать по наружной поверхности уровнемера УН-800 (в местах расположения измерительных зон) с помощью медного зажима. Таким образом, ток от источника питания будет течь по поверхности уровнемера от одной клеммы к другой и создавать падение напряжения на каждой зоне, имитируя заполнение/слив жидкого натрия. График перемещения медного зажима во всем диапазоне измерения уровнемера УН-800 (от 0 мм до 800 мм) приведен на рисунке 4.

Отметка расположения медного зажима сравнивалась с показаниями уровнемера УН-800 с помощью линейки. Результаты сравнения показали, что различие между показаниями уровнемера УН-800 и линейкой составляют 2 мм во всем диапазоне измерения. Анализ полученных результатов показал, что в первом случае погрешность измерения связана с

диаметром контактного кольца, которое составляет 2 мм и сложностью обеспечить надёжный контакт данного кольца на корпусе уровнемера. Во вторых, было обнаружено влияние нормирующих усилителей на точность измерения. Так как уровень натрия является суммой всех сложенных значений уровня зон погруженных в натрий, на вышестоящих зонах погрешность измерения увеличивается, так как суммируется погрешность всех нижних зон. Таким образом, на точность измеренного уровня на зонах с 1 по 5 в большей степени оказывает влияние диаметр контактного кольца, приведенная погрешность составляет не более 0,125% от верхнего диапазона измерения или 1% от измерительной зоны (100 мм). А начиная с 6 зоны, приведенная погрешность от верхнего диапазона измерения, увеличивается и достигает 0,25% на 8 зоне или 2% от измерительной зоны (100 мм). Для уменьшения погрешности измерения уровня при настройках в «сухом» режиме можно выполнить ряд доработок: использовать вместо прижимного контактного кольца пайку контактного проводника меньшего диаметра; более точно определить место расположения измерительных электродов и учитывать полученные данные в алгоритме обработки данных; заменить или доработать нормирующие усилители для более точного измерения падения напряжения на зонах; усовершенствовать алгоритм обработки данных, при котором зона, погруженная в натрий, будет приравниваться к размеру этой зоны. Однако полученные данные «сухой» калибровки удовлетворяют условиям, при котором приведенная погрешность измерения уровня составляет не более 1% от верхнего диапазона измерения, поэтому измерительная система в таком составе была использована на эксперименте с жидким натрием.

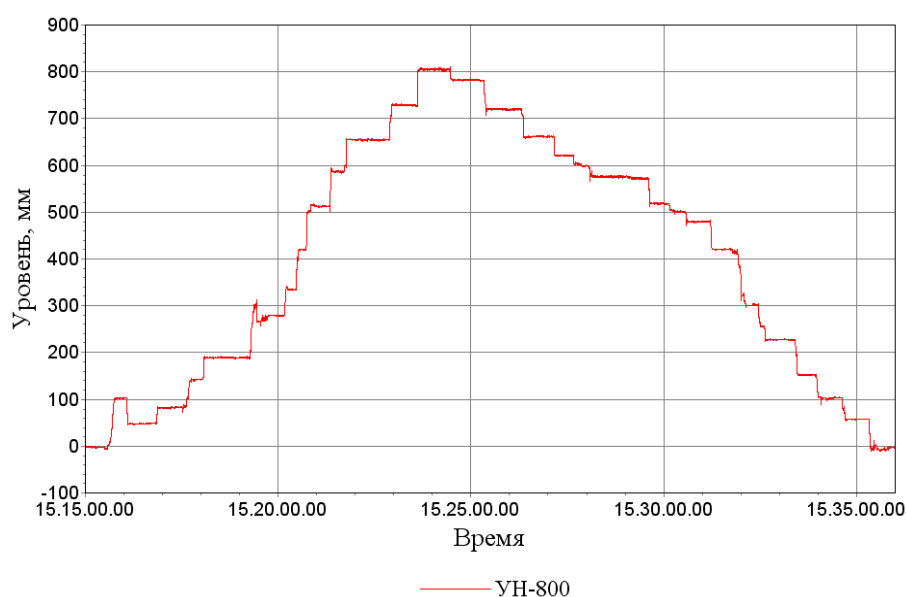


Рисунок 4. Графики изменения показаний уровня при проведении «сухой» (без натрия) настройки уровнемера УН-800 в диапазоне от 0 мм до 800 мм



Рисунок 5. Общий вид схемы эксперимента (трубопровод и экспериментальная ёмкость без теплоизоляции)

4 ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ ПО ПРОВЕРКЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ УРОВНЕМЕРА УН-800 С ЖИДКИМ НАТРИЕМ

Основная цель данной работы заключается в проверке работоспособности уровнемера УН-800 в среде жидкого натрия с достаточной точностью и надёжностью, а также подтверждения правильности сделанных технических решений.

Для проведения экспериментальных работ по проверке работоспособности уровнемера УН-800 использована следующая схема: уровнемер УН-800 установлен в крышку экспериментальной ёмкости, которая соединена трубопроводом с разделительной ёмкостью. Предварительно натрий в разделительной ёмкости равномерно нагревался до температуры 200 °С, трубопровод и экспериментальная ёмкость также нагрели до температуры 200 °С. Затем жид-

кий натрий вытесняется из разделительной ёмкости в экспериментальную инертным газом давлением до 2 атм. Заполнение экспериментальной ёмкости выполняется снизу вверх и регулируется открытием/закрытием вентиля. Слив жидкого натрия: осуществляется сбросом давления из разделительной ёмкости и подачей давления до 2 атм. инертного газа в экспериментальную ёмкость. Слив жидкого натрия также регулируется открытием/закрытием вентиля. Общий вид схемы эксперимента показан на рисунке 5.

Заполнение экспериментальной ёмкости до уровня 630 мм контролировалось датчиками пустот [5], в количестве 3 шт., которые расположены на следующих контрольных отметках относительно уровнемера УН-800: к.т. HV01 (30 мм), к.т. HV02 (230 мм) и к.т. HV03 (430 мм). На уровнемер УН-800 подается ток значением 20 А от регулируемого источника постоянного тока. На все датчики пустот устанавливается ток на уровне 100 мА от управляемого источника постоянного тока. Схема расположения уровнемера УН-800 и датчиков пустот в экспериментальной ёмкости приведена на рисунке 6.

Датчики пустот представляют собой индикаторные устройства, которые указывают наличие натрия или его отсутствие в местах установки датчика. Показания с датчиков пустот интерпретируются следующим образом: при отсутствии натрия падение напряжения на чувствительном элементе датчика соответствует определенному значению выше нуля (до 50 мВ), а при наличии жидкого натрия в месте расположения датчика натрий шунтирует его, происходит падение напряжения на чувствительной части датчика, напряжение уменьшается практически до нуля.

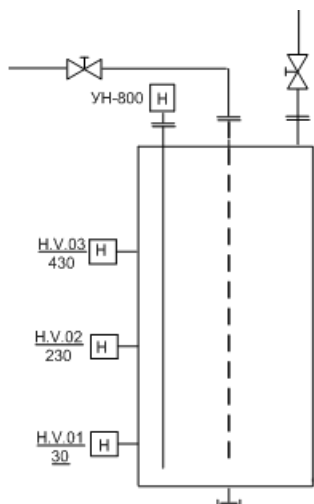


Рисунок 6. Схема расположения уровнемера УН-800 и датчиков пустот в экспериментальной ёмкости

5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 7 представлены экспериментальные результаты изменения сигналов напряжения с датчиков пустот и уровня жидкого натрия в процессе

заполнения и слива экспериментальной ёмкости. Из рисунка 7-а видно, что начальное значение уровня жидкого натрия до начала эксперимента составляет 0 мм. В момент времени 14:45:56 жидкий натрий начинает заполняться в экспериментальную ёмкость постепенно с «полочками» до уровня ~630 мм в течении 7 минут. При достижении уровня жидкого натрия около 22 мм напряжение датчика пустот к.т. HV01 (отм. 30) изменяется с 28 мВ до 8 мВ, что означает погружение датчика пустот в натрий. Не соответствие показаний уровня жидкого натрия и датчика пустот к.т. HV01 (отм. 30), расположенного на отметке 30 мм можно объяснить следующими причинами: смещением чувствительной части датчика при установке в экспериментальную ёмкость, а также низкой температурой жидкого натрия (200 °С), что влияет на скорость растворения гидроокислов и окислов на поверхности измерительных датчиков в жидком натрии, и тем самым оказывает влияние на чувствительность датчиков (их времени срабатывания) [6, 7, 8]. При достижении уровня ~100 мм выдерживается «полочка» для проверки работы уровнемера УН-800 в статическом режиме.

В момент времени 14:46:52 уровень жидкого натрия изменяется со 100 мм до 282 мм в течении 37 секунд и затем выдерживается «полочка». При достижении уровня жидкого натрия 223 мм напряжение датчика пустот к.т. HV02 (отм. 230) изменяется с 25 мВ до 12 мВ, что означает погружение датчика пустот в натрий. В момент времени 14:49:30 уровень жидкого натрия изменяется с 283 мм до 463 мм в течении 55 секунд, затем выдерживается «полочка». При достижении уровня жидкого натрия 410 мм напряжение датчика пустот к.т. HV03 (отм. 430) изменяется с 24 мВ до 6 мВ, что означает погружение датчика пустот в натрий. В момент времени 14:51:35 уровень жидкого натрия изменяется с 474 мм до 625 мм в течении 50 секунд, затем выдерживается «полочка».

На рисунке 7-б представлены графики изменения сигналов напряжения с датчиков пустот и уровня жидкого натрия с уровнемера УН-800 в процессе слива жидкого натрия из экспериментальной ёмкости. Из рисунка 7-б видно, что начальное значение уровня жидкого натрия в момент времени 15:51:30 составляет 645 мм и постепенно изменяется до 400 мм и выдерживается «полка» длительностью 90 секунд. Затем уровень жидкого натрия продолжает изменяться до 196 мм, после чего слив жидкого натрия останавливается. На рисунке 7-б видно, что в момент времени 16:01:31 сигнал датчика пустот к.т. HV03 при достижении уровня 432 мм изменяется с 6 мВ до 7 мВ. Это небольшое изменение можно принять за срабатывание, т.е. уход натрия с места расположения датчика пустот. Небольшое изменение сигнала датчика пустот можно объяснить тем, что в установочном штупере присутствует натрий, который и шунтирует датчик пустот. На рисунке 7-б

видно, что в момент времени 16:09:43 сигнал датчика пустот к.т. HV02 при достижении уровня 231 мм изменяется с 6,8 мВ до 8,4 мВ. Это небольшое изменение так же можно принять за срабатывание, т.е. уход натрия с места расположения датчика пустот. Датчик пустот к.т. HV01 находится в натрии на протяжении всего эксперимента, что связано с невозможностью слить натрий с этой отметки.

На рисунке 7-в представлены графики изменения сигналов напряжения с датчиков пустот и уровня жидкого натрия с уровнемера УН-800 в процессе заполнения экспериментальной ёмкости. Из рисунка 7-в видно, что в показаниях уровнемера с момента времени 16:17:07 до начала заполнения наблюдаются кратковременные провалы ниже уровня 184 мм. Эти провалы можно объяснить образованием газовых полостей при перекачивании жидкого натрия инертным газом из одной ёмкости в другую. Момент времени 16:19:47 начало заполнения ёмкости, уровень жидкого натрия плавно изменяется с 184 мм до 420 мм, затем выдерживается «полочка» в течении 65 секунд. Далее уровень жидкого натрия увеличивается до 490 мм и заполнение экспериментальной ёмкости останавливается. На рисунке 7-в видно, что датчики пустот к.т. HV02 и к.т. HV03 сработали при достижении уровня 220 мм и 424 мм соответственно. При этом интересно рассмотреть более детально показания датчика пустот к.т. HV03, в момент времени нахождения датчика пустот на полке в 420 мм. Данный момент времени интересен тем, что происходит очень медленное заполнение ЭЕ, при этом датчик пустот к.т. HV03 срабатывает два раза. В первый раз, в интервале времени от 16:20:40 по 16:21:22 показания датчика пустот уменьшаются с 13,4 мВ до 12,8 мВ и вновь увеличиваются до 13,4 мВ, показания уровнемера в этом интервале времени плавно увеличиваются от 413 мм до 422 мм. Во второй раз датчик пустот сработал в 16:22:06 (показания уменьшились с 13,4 мВ до 12,7 мВ), показания уровнемера составили 424 мм. А к моменту времени 16:22:11 показания датчика пустот уменьшились до 12 мВ и не изменялись, что означает полное погружение датчика в жидкий натрий. При этом показания уровнемера составили 430 мм.

Из данных показания датчика пустот к.т. HV03 и уровнемера УН-800 можно сделать следующий вывод: на датчик пустот находящийся в ЭЕ с жидким натрием, оседают пары натрия образуя пленку окислов и гидроокислов, что возможно связано с небольшим содержанием паров воды в инертном газе – азоте [7]. Данная пленка имеет электропроводящие свойства. Таким образом, активное сопротивление пленки становится соизмеримо или меньше активного сопротивления корпуса датчика пустот. По

этой причине показания датчиков пустот покрытых пленкой окислов и гидроокислов меняется незначительно, тем самым затрудняя интерпретацию показаний с датчиков пустот. Однако чем ближе жидкий натрий находится к датчику пустот, тем быстрее разрушается пленка окислов и гидроокислов, что и наблюдается на «полке» 420 мм в интервале времени от 16:20:40 по 16:21:22, когда датчик пустот к.т. HV03 показывает наличие натрия относительно уровнемера на уровне 413 мм – натрий образует мостик с пленкой окислов, а при уровне натрия 422 мм пленка разрушается – показания датчика пустот указывают на отсутствие натрия в месте расположения датчика. В момент времени полного погружения датчика пустот в натрий уровень натрия по уровнемеру УН-800 хорошо совпадает с местом расположения датчика пустот к.т. HV03 – 430 мм.

На рисунке 7-г представлены графики изменения сигналов напряжения с датчиков пустот и уровня жидкого натрия с уровнемера УН-800 в процессе слива жидкого натрия из экспериментальной ёмкости. Из рисунка 7-г видно, что в момента времени 16:30:10 начинается слив жидкого натрия, показания уровнемера УН-800 изменяются плавно с 491 мм до 90 мм в течении 50 секунд. При достижении уровня 90 мм слив с экспериментальной ёмкости останавливается. На рисунке 7-г видно, что датчики пустот к.т. HV02 и к.т. HV03 сработали при достижении уровня 235 мм и 435 мм соответственно.

На рисунке 7-д представлены графики изменения сигналов напряжения с датчиков пустот и уровня жидкого натрия с уровнемера УН-800 в процессе заполнения экспериментальной ёмкости. Из рисунка 7-д видно, что в момент времени 16:36:47 начинается заполнение ёмкости, показания уровнемера УН-800 изменяются плавно с 90 мм до 530 мм в течении 30 секунд. При достижении уровня 530 мм заполнение экспериментальной ёмкости останавливается. На рисунке 7-д видно, что датчики пустот к.т. HV02 и к.т. HV03 сработали при достижении уровня 223 мм и 428 мм соответственно.

На рисунке 7-е представлены графики изменения сигналов напряжения с датчиков пустот и уровня жидкого натрия с уровнемера УН-800 в процессе слива жидкого натрия из экспериментальной ёмкости. Из рисунка 7-е видно, что в момента времени 16:42:00 начинается слив жидкого натрия, показания уровнемера УН-800 изменяются плавно с 560 мм до 90 мм в течении 90 секунд. При достижении уровня 90 мм слив жидкого натрия с экспериментальной ёмкости останавливается. На рисунке 7-е видно, что датчики пустот к.т. HV02 и к.т. HV03 сработали при достижении уровня 233 мм и 435 мм соответственно.

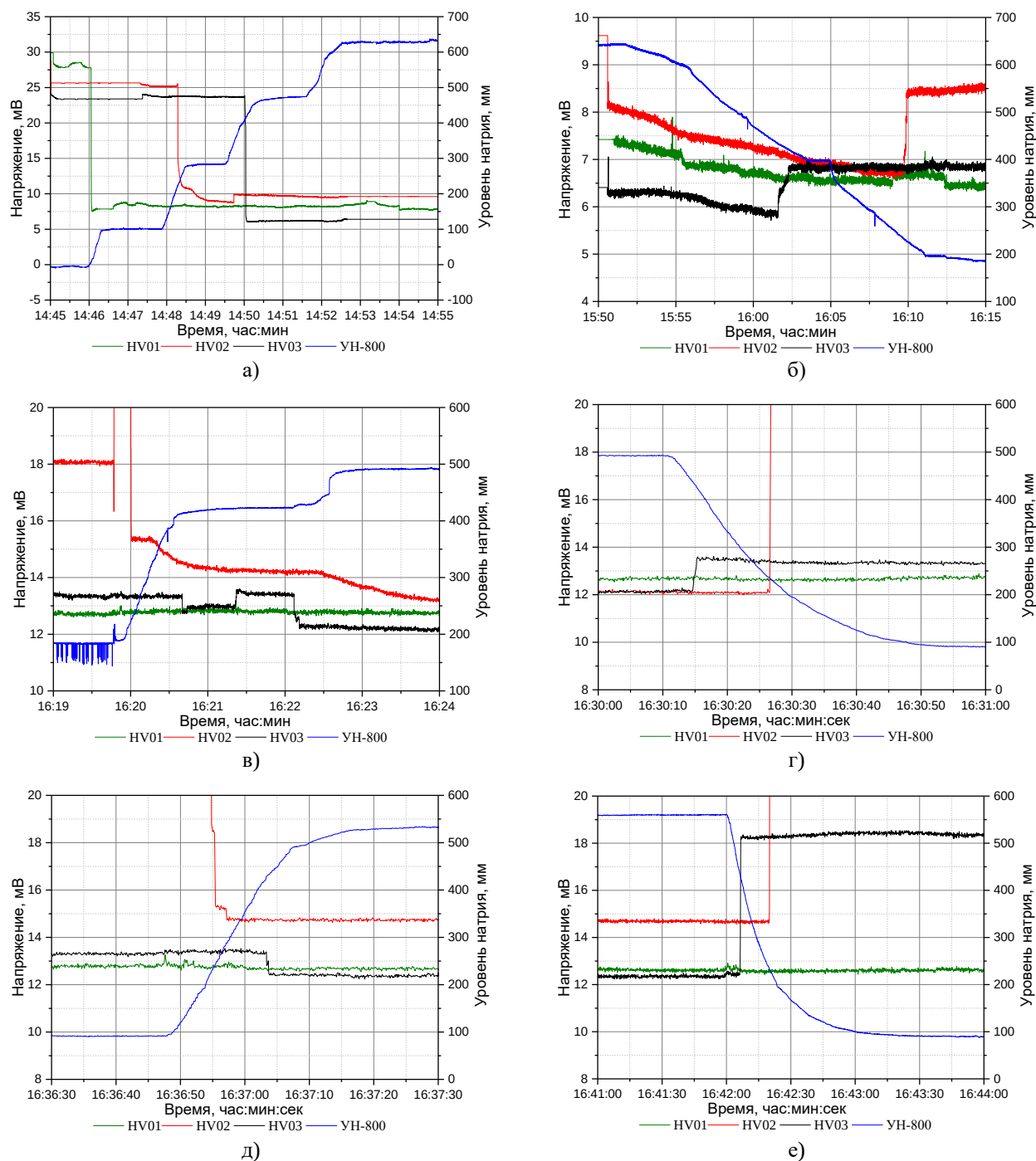


Рисунок 9. Графики изменения сигналов напряжения с датчиков пустот и уровня жидкого натрия с уровнемера УН-800 в процессе заполнения (а, в, д) и слива (б, г, е) экспериментальной ёмкости

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе экспериментальных работ по проверке работоспособности уровнемера УН-800 была установлено следующее:

1. Измерительная система параметров жидкого натрия в составе стабилизированного источника питания, нормирующих усилителей, блока сбора данных – L-CARD LTR-EU-2 с модулем LTR-11, ПК с программным обеспечением обработки измерительных данных работоспособна и соответствует заяв-

ленным техническим характеристикам технического задания.

2. Погрешность измерения при «сухой» калибровки уровнемера УН-800 совместно с измерительной системой параметров жидкого натрия составляет не более 2 мм во всем диапазоне измерения уровнемера УН-800.

3. По результатам проведенного эксперимента с жидким натрием установлено, что уровнемер УН-800 с измерительной системой параметров жид-

кого натрия обеспечивает измерение уровня жидкого натрия (при температуре от 150 °С до 200 °С) в диапазоне от 0 мм до 800 мм с приведенной погрешностью не более 1,2% от верхнего диапазона измерения. На показания датчиков пустот и уровнемера УН-800 оказывает влияние пленка окислов и гидроокислов натрия в экспериментальной ёмкости, что увеличивает погрешность измерения уровнемера УН-800. Пленка окислов и гидроокислов натрия в меньшей степени влияет на уровнемер чем на датчики пустот, что связано с меньшим активным сопротивлением чувствительного элемента датчика уровня УН-800.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Kubo, Y. Tobita, I. Sato, S. Kotake, H. Endo, K. Koyama, K. Konishi, K. Kamiyama, K. Matsuba, J. Toyooka, V.A. Zuyev, A.V. Pakhnits, V.A. Vityuk, V.A. Gaidaichuk, A.D. Vurim, A.A. Kolodeshnikov, Y.S. Vassiliev. MAIN OUTCOMES AND FUTURE PLAN OF THE EAGLE PROJECT. Вестник НЯЦ РК. №1, март 2016.
2. F. Serre, F. Payot, C. Suteau, L. Trotignon, E.G. Baturbekov, A.D. Vurim, A.V. Pakhnits, V.A. Vityuk, S. Kubo, A. Katoh, Y. Tobita, K. Kamiyama, K. Matsuba, J. Toyooka/ R&D AND EXPERIMENTAL PROGRAMS FOR MITIGATING SEVERE ACCIDENTS CONSEQUENCES IN GENIV SFRS AND IN THE ASTRID TECHNOLOGY DEMONSTRATOR, Вестник НЯЦ РК. №1, март 2016.
3. Марков А.П., Марукович Е.И., Патук Е.М., Старовойтов А.Г. Современные способы и средства уровнеметрии в литье и металлургии. – Литье и металлургия № 3 (47), 2008, с. 182–188.
4. Вельт И.Д. Кондуктометрический способ измерения уровня жидкого натрия. – Измерительная техника, 2014, №8, с. 38-41.
5. Каменев В.А. Система измерения пустотных фракций в жидком натрии датчиками пустот. Сборник трудов молодых ученых. Курчатов, РК. 2003, с 252–259.
6. H. W. Slocumb, Liquid Metal Level Measurement (Sodium) State-of-the-Art-Study, NAA-SR-MEMO-12582 (Liquid Metal Engineering Center, 1967).
7. Натрий библиографический обзор, 1998, ИАЭ НЯЦ РК.
8. S. J. Fanciullo, “Development of Liquid Metal Level Probes”, PWAC 423 (April 27, 1964).

СҰЙЫҚ НАТРИЙДІҢ ДЕҢГЕЙІН ӨЛШЕУГЕ АРНАЛҒАН КОНДУКТОМЕТРИЯЛЫҚ ТИПТІ КӨП ЗОНАЛЫҚ ДЕҢГЕЙ ӨЛШЕГІШТІ ӨЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ

Тарасенко Е.В., Райханов М.Б., Сарсембаев Е.А.

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

Жұмыста сұйық натриймен арнайылық реакторлық және реактордан тыс эксперименттерді жүргізу кезінде эксперименттік сымдылықтардағы сұйық натрийдің деңгейін өлшеуге арналған кондуктометриялық типті көп зоналық деңгей өлшегіш сипатталған. Көп зоналық деңгей өлшегіш құрылғысы, сұйық натрий деңгейін есептеу үшін деңгей өлшегіштен алынған мәліметтерді өңдеу алгоритмі, сондай-ақ деңгей өлшегіштің өлшеу жүйесі қарастырылған. Сұйық натрийдің температурасы 200 °С кезіндегі жүргізілген эксперименттердің нәтижелері және де қуыс датчиктерінің көрсетулері мен деңгей өлшегіш көрсетулері салыстырылған.

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF A MULTI-ZONE LEVEL METER OF CONDUCTOMETRIC TYPE TO MEASURE THE LEVEL OF LIQUID SODIUM

E.V. Tarasenko, M.B. Raikhanov, E.A. Sarsembayev

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

The paper describes a multi-zone level meter of conductometric type designed for measuring the level of liquid sodium in experimental tanks during in-pile and out-of-pile experiments with liquid sodium. The design of the multi-zone level sensor, the algorithm for processing the obtained data from the level meter for converting them to the level of liquid sodium, as well as the measuring system of the level meter are considered. There are results of the experiments and comparison of the level meter readings with the indications of the void sensors at a liquid sodium temperature of 200 °С.

УДК 504.4.054:550.4:614.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ НАХОЖДЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ р. УЗЫНБУЛАК

Мухамедияров Н.Ж., Койгельдинова М.Т., Лукашенко С.Н.,
Есильканов Г.М., Темиржанова А.Е., Шакенов Е.З.

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

В настоящей работе приведены результаты исследования вариативности форм нахождения химических элементов в донных отложениях ручья Узынбулак. В большинстве случаев показатели абсолютной концентрации форм соединений элементов увеличиваются от наиболее легко извлекаемых к наиболее прочносвязанным с почвенными компонентами формам соединений: $XЭ_{\text{води}} < XЭ_{\text{обм}} < XЭ_{\text{орг}} < XЭ_{\text{сп. сорб}} < XЭ_{\text{ост}} < XЭ_{\text{окс/гидрокс Fe и Mn}}$. Следует отметить, что для Mn, Sr и Ba выявлена максимальная степень накопления в обменной форме, что свидетельствует об их наибольшей миграционной способности и биодоступности.

Проведена оценка миграционной способности Be, Mo и U в донных отложениях, концентрации которых превышали ПДК. Наибольшей способностью связываться с самыми устойчивыми компонентами донных отложений (оксидами и гидроксидами Fe и Mn и остаточной формой) обладает Be и U. Максимальное содержание данных элементов во всех исследуемых формах наблюдалось на отрезке от 9 по 11 км.

Распределение форм нахождения исследуемых химических элементов отличаются значительной неоднородностью, с разницей в несколько порядков. В целом, высокое содержание исследуемых элементов в донных отложениях имеет естественное происхождение и обусловлено минералогическим составом почвообразующих пород горного массива Дегелен.

Ключевые слова: Семипалатинский испытательный полигон, площадка «Дегелен», формы нахождения, последовательное экстрагирование.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование поверхностных вод самого протяженного р. Узынбулак испытательной площадки «Дегелен» заслуживает особого внимания, так как природные воды ручья используется местным населением для водопоя скота. Ранее проведенные работы выявили не только радионуклидное загрязнение ручья (^3H), но и повышенное содержание в воде и донных отложениях тяжелых металлов (ТМ) и токсичных элементов (ТЭ). Выявлены значительные превышения ПДК в воде р. Узынбулак для Be, Mo и U [1–5].

Степень токсичности донных отложений ручья, содержащих повышенные концентрации некоторых химических элементов, определяется не столько содержанием валовой формы, сколько химическими формами, в которых они доступны для включения в биогенный обмен. Поэтому для определения подвижности и биологической доступности ТМ и ТЭ в донных отложениях необходимо изучение их форм нахождения.

В настоящее время для определения форм нахождения химических элементов в донных отложениях используется множество схем последовательных экстрагирований [6, 7]. Последовательное экстрагирование проводят реагентами, позволяющими обнаружить различия в прочности удерживания химических элементов отдельными почвенными компонентами (органическими веществами, органо-минеральными соединениями, карбонатами, силикатными и несиликатными минералами и т.д.).

В водорастворимую вытяжку переходят ионы химических элементов, десорбирующиеся из почвы по механизму ионного обмена, а также растворимые комплексные соединения элементов с компонентами почвы. В обменную вытяжку переходят элементы, сорбированные в почве по механизму ионного обмена. Обменными называют ионы, связанные электростатическими силами с различными почвенными компонентами: глинистыми минералами, органическим веществом, оксидами и гидроксидами Al, Fe, Mn, Si, и которые могут быть замещены эквивалентным количеством ионов из нейтральных растворов нейтральных солей. Обменные формы соединений, так же, как и водорастворимые представляют собой наиболее подвижные и биологически доступные формы соединений химических элементов в почвах.

Специфически сорбированная форма занимает промежуточное положение, в состав которой входят различные твердофазные соединения, удерживаемые почвенными компонентами за счет связей, отличных от ионной (то есть необменно).

Органические формы, экстрагируемые раствором 0,1M NaOH, содержат в себе химические элементы, связанные с органическими веществами почвы: гуминовыми кислотами и фульвокислотами, и их солями, которые свободно или непрочно связаны с минеральной частью почвы.

В форму, связанную с оксидами и гидроксидами железа и марганца входят элементы, образующие прочные поверхностные комплексы и высвобождающиеся при разрушении гидроксидов Fe и Mn. Данная форма включает в себя химические элементы,

преимущественно, в необменном состоянии, т.е. те формы элементов, которые не переходят в почвенные растворы в природной среде при обычных условиях.

Таблица 1. Степень подвижности химических элементов в зависимости от pH [8].

pH почвы	Степень подвижности элемента		
	практически неподвижен	слабоподвижен	подвижен
Почвы кислые pH <5,5	Mo	Pb, Cr, Ni, V, As, Se, Co	Sr, Ba, Cu, Cd, S, Ni, Zn, Hg
Почвы слабокислые и нейтральные pH 5,5-7,5	Pb	Sr, Ba, Cr, Ni	Zn, V, As, S
Почвы щелочные и сильнощелочные pH 7,5-9,5	Pb, Ba, Co	Co, Mo (4), Hg, Zn, Ag, Sr, Cu, Cd	Mo (6), V, As, S

Остаточная форма содержит в себе элементы, не растворяющиеся в вышеперечисленных реагентах и недоступные растениям. Данная форма включает элементы, входящие в состав алюмосиликатов, которые прочно закреплены в кристаллических решетках минералов.

Буферность почв по отношению к загрязняющим веществам, а вместе с ней и характер распределения химических элементов между прочносвязанными и подвижными соединениями определяется комплексом почвенных факторов: гранулометрический состав почвы, емкость катионного обмена, окисли-

тельно-восстановительные условия, кислотно-основные условия.

Например, изменение pH влияет на величину заряда почвенно-поглощающего комплекса почвы, емкость катионного обмена, на растворимость и миграционную подвижность многих ТМ. Подвижность микроэлементов в различных почвах в зависимости от pH почвенного раствора представлена в таблице 1.

Однако следует отметить, что данная классификация химических элементов по степени подвижности условна и имеет весьма обобщенный характер. В целом подвижность химических элементов зависит от многих факторов: от природы самого элемента, от физико-химических условий среды, состава почв и т.д. В связи с этим изменение распределения химических элементов по формам соединений может принимать широкий диапазон данных. Целью данной работы является оценка вариативности форм нахождения тяжелых металлов и токсичных элементов в донных отложениях р. Узынбулак.

1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1.1 Отбор и подготовка проб донных отложений

Отбор проб донных отложений р. Узынбулак проводился в июле 2015 года. Пробы отбирались от места выхода водотока на дневную поверхность через каждые 500 м до 9 км, на отрезке от 9 до 13 км отбор проводился через каждые 250 м (рисунок 1). Пробы были отобраны не во всех точках, в связи с сезонным пересыханием русла.

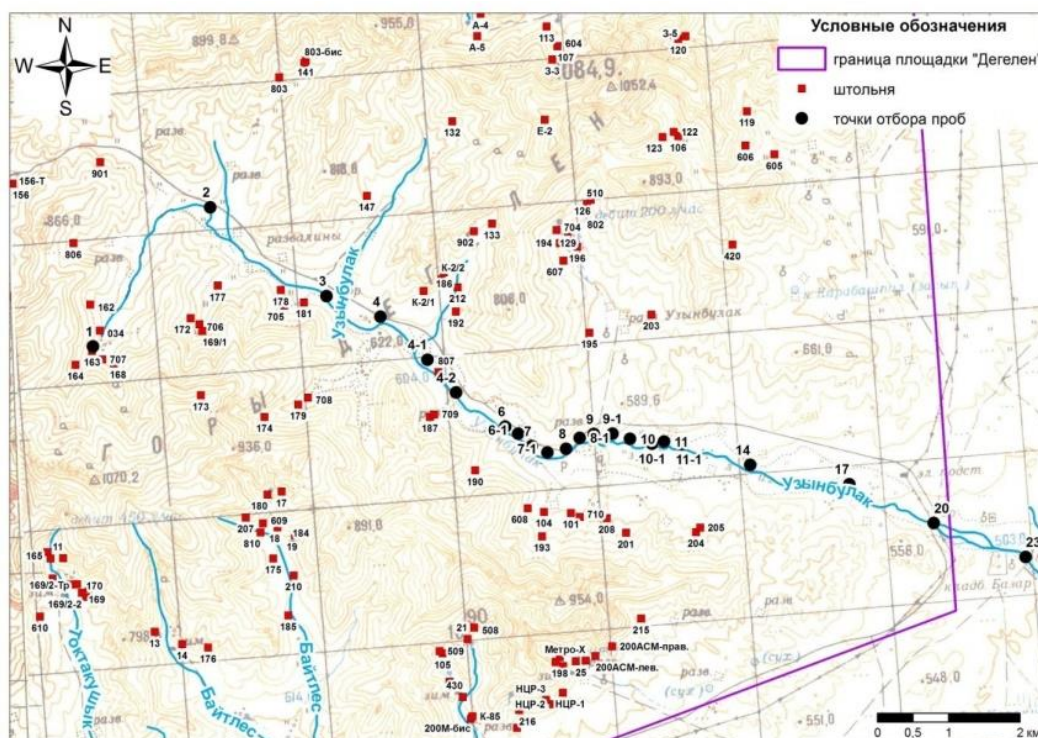


Рисунок 1. Схема отбора проб по р. Узынбулак

Таблица 2. Формы соединений элементов и условия их извлечения из донных отложений

№	Название формы соединений	Экстрагент	Условное обозначение	Время
1	Водорастворимая	H ₂ O	XЭ _{водн}	1 час
2	Обменная	0,1M Ca(NO ₃) ₂	XЭ _{обм}	1 час
3	Слабо специфически сорбированная	3 % CH ₃ COOH	XЭ _{сп. сорб}	1 час
4	Связанная с органическим веществом	0,1M NaOH	XЭ _{орг}	1 час
5	Связанная с оксидами/гидроксидами железа и марганца (осадочная форма)	Тамма (0,2M (NH ₄) ₂ (C ₂ O ₄) + 0,2M C ₂ H ₂ O ₄)	XЭ _{окс/гидрокс Fe и Mn}	1 час в темноте
6	Остаточная	HF (конц) + 7M HNO ₃	XЭ _{ост}	—

Пробы донных отложений отбирались согласно ГОСТ 17.1.5.01-80 «Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность». Отбор проб донных отложений производился методом укола на глубину 0–5 см на площади 100 см² [9].

Отобранные пробы донных отложений весом не менее 1 кг просушивались на воздухе до воздушно-сухого веса. Влажные почвы сушились в сушильном шкафу при температуре 105 °С в течение 3–6 часов. Воздушно-сухие пробы донных отложений просеивались через сито (полиамидное) с диаметром отверстий 1 мм. Методом квартования отбирался образец массой 200 г и истирался на дисковой мельнице *Pulverisette 9* (гарнитура – закаленная сталь) в течение 20 минут со скоростью вращения 1000 об/мин. Повторно отбирали из перемолотого гомогенного образца методом квартования навеску 50 г и дополнительно истирали в течение 20 минут. Далее отбирали из перемолотого гомогенного образца методом квартования конечную навеску для анализа массой 5 г.

1.2 Методика последовательного экстрагирования

Метод последовательного экстрагирования включает в себя последовательное фракционирование химических элементов из одной навески пробы, при этом начинают с наиболее «слабого» экстрагента, и заканчивают наиболее «сильным». На основании обобщения разнообразных методов извлечения [6, 10] можно выделить следующие формы соединений, которые представлены в таблице 2.

1.3 Подготовка образцов к анализу

Определение форм соединений элементов осуществляли из одной навески донных отложений. Соотношение донные отложения: экстрагент составляло 1:10; время воздействия – 1 час, в течение которого проба встряхивалась на ротаторе. После окончания взаимодействия раствор отделяли от твердой фазы центрифугированием в течение 10 минут при частоте вращения 4000–6000 об/мин. После каждого экстрагента пробы промывали дистиллированной водой. Полученный раствор разбавлялся в соотношении 1:10.

1.4 Проведение аналитических работ

Определение содержания химических элементов проводилось методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) на квадрупольном масс-спектрометре *Agilent 7700x* фирмы *Agilent Technologies* и *Elan 9000* фирмы *Perkin Elmer SCIEX*, а также атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-АЭС) *iCap 6300Duo* фирмы *Thermo Scientific*.

Для построения калибровочных графиков использовались мультиэлементные стандартные растворы, зарегистрированные в реестре ГСИ РК под № KZ.03.02.02416-2016, KZ.03.02.02414-2016. Контроль качества измерений осуществлялся путём измерения калибровочного раствора через каждые 10 проб. При неудовлетворительном результате калибровки (отклонение калибровочного графика на 8–10 %) проводилась перекалибровка прибора, при которой учитывались новые параметры фона.

Анализ проведен согласно методике ISO 17294-2:2006 (Е) «Качество воды. Применение масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (МС-ИСП). Часть 2: Определение 62 элементов» (номер гос. регистрации 022/10505 от 23.09.2016г.) [11].

2 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1 Формы нахождения химических элементов в донных отложениях ручья Узынбулак

В таблице 3 представлено содержание форм соединений химических элементов в донных отложениях. Поскольку утвержденные экологические нормативы содержания элементов в донных отложениях отсутствуют, при анализе полученных результатов были использованы кларки данных элементов в почве по Виноградову [12].

Анализ данных таблицы показал, что валовое содержание большинства исследуемых химических элементов находится на уровне кларковых значений. Выявлено превышение уровня кларка почв мира для Ве, и U в 3,3 и 4,8 раз соответственно. В донных отложениях р. Узынбулак показатели абсолютной концентрации форм химических элементов в большинстве случаев представили ряд: XЭ_{водн} < XЭ_{обм} < XЭ_{орг} < XЭ_{сп. сорб} < XЭ_{ост} < XЭ_{окс/гидрокс Fe и Mn}. Как видно, содержание элементов увеличивалось от наиболее легко извлекаемых к наиболее прочно связанным с почвенными компонентами формам соединений.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ НАХОЖДЕНИЯ
ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ р. УЗЫНБУЛАК**

Таблица 3. Формы соединений элементов в донных отложениях ручья при последовательном экстрагировании (n=22), мг/кг

Элемент	Формы соединений						Валовое содержание	Кларк в почвах мира [12]
	Me _{хЭводн} min-max	Me _{хЭобм} min-max	Me _{хЭсп. сорб} min-max	Me _{хЭорг} min-max	Me _{хЭокс/гидрокс Fe и Mn} min-max	Me _{хЭост} min-max		
Be	<u>0.07</u> 0,001-0,9	<u>0.08</u> <0,001-1,3	<u>6</u> 0,4-16	<u>0.68</u> 0,02-3,3	<u>9.6</u> 0,4-24	<u>3.9</u> 1,1-21	20	6
Mn	<u>6.4</u> 0,3-210	<u>80</u> 5-1300	<u>170</u> 6,8-2300	<u>25</u> 0,8-640	<u>37</u> 6,2-950	<u>34</u> 8-1200	350	1000
Sr	<u>3.7</u> 0,29-29	<u>57</u> 26-74	<u>15</u> 2,9-130	<u>5.7</u> 0,2-19	<u>0.7</u> 0,4-4,9	<u>9.7</u> 2,4-30	92	340
Mo	<u>1</u> 0,07-12	<u>0.2</u> 0,01-1,3	<u>0.02</u> 0,005-0,04	<0,001	<u>1.4</u> 0,2-5,7	<u>2.6</u> 0,8-15	5,2	20
Ba	<u>0.7</u> 0,08-2,3	<u>79</u> 39-150	<u>43</u> 27-80	<u>27</u> 0,6-37	<u>27</u> 16-66	<u>13</u> 0-680	190	500
U	<u>0.14</u> 0,01-1,4	<u>0.01</u> <0,001-0,08	<u>0.82</u> 0,02-43	<u>0.13</u> <0,001-2,2	<u>8.6</u> 0,8-390	<u>2.1</u> 0,4-140	12	2,5

Примечание: Для каждого элемента подсчитывались основные параметры распределения химических элементов: медиана (Me), минимальное (min) и максимальное (max) значения, меньше предела обнаружения (<п.о.); — отсутствие литературных данных.

На рисунке 2 представлены формы соединений исследуемых элементов в процентах от валового содержания.

Для щелочноземельных элементов Sr и Ba (рисунок 2, а, б) максимальная степень накопления в донных отложениях выявлена в обменной форме – 62 и 42 % соответственно. Высокое содержание данных элементов объясняется вытеснением ионами кальция, так как они схожи по своим свойствам и могут замещать друг друга.

Известно, что водорастворимая и обменная фракции представляют собой наиболее подвижные и биологически доступные формы соединений. Специфически сорбированная фракция занимает промежуточное положение. Так в данной форме установлено высокое относительное содержание Sr (17 %) и Ba (22 %).

Исследованиями установлено, что Mn является одним из наиболее подвижных элементов в донных отложениях (рисунок 2, в). Содержание Mn в легкодоступных формах (водорастворимая, обменная и слабо специфически сорбированная форма) достигала 73 % от валового содержания. Это указывает на то, что данный элемент легко мобилизуется даже при незначительных изменениях внешних условий.

Таким образом, для щелочноземельных элементов (Sr, Ba) и Mn выявлено схожее поведение, т.е. максимальное накопление в легкодоступных формах соединений (до 83 %) и относительно минимальное накопление в прочносвязанных формах (до 21 %).

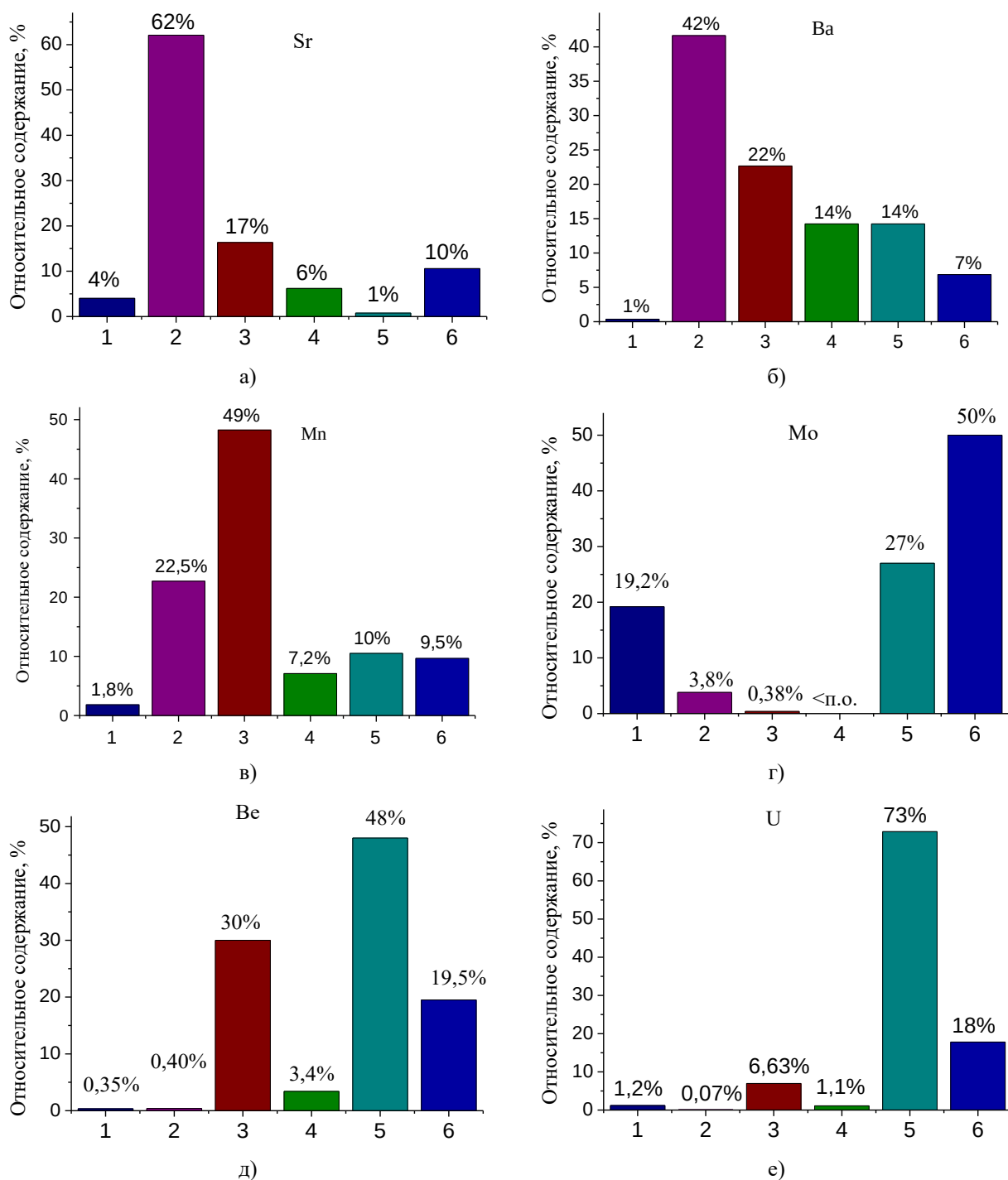
Рассмотрим распределение Mo по исследуемым формам соединений в % от валового содержания (рисунок 2, г). Особо следует отметить, что из всех исследуемых элементов для Mo характерно значительное накопление в водорастворимой форме (19,2 %). При этом для данного элемента характерно

высокое накопление также и в прочносвязанных формах: форме, связанной с оксидами и гидроксидами железа и марганца (27 %) и остаточной форме (50 %).

Для бериллия выявлено значительное присутствие подвижных соединений, а именно непрочно связанных специфически сорбированных соединений (30 %), которые можно рассматривать как промежуточные, переходные к прочно связанным. В самых подвижных водорастворимых и обменных формах содержалось всего менее процента от общего содержания элемента (рисунок 2, д). Следует отметить, что в наибольшей степени Be фиксируется в донных отложениях в основном, благодаря оксидам и гидроксидам Fe и Mn (48 %).

Для урана наблюдалась иная картина распределения по формам соединений (рисунок 2, е). Исследованиями установлено, что для U характерна низкая миграционная способность, в легкодоступных формах находилось не более 7 % от валового содержания. Только для данного элемента выявлено максимальное накопление в осадочной форме (U_{окс/гидрокс Fe и Mn}) до 73 %. Это связано с процессом адсорбции ионов уранила на поверхности оксидов и гидроксидов Fe и Mn [13].

Таким образом, рассматривая особенности форм нахождения исследуемых элементов можно сделать вывод, что наибольшее содержание U и Be находилось в устойчивых формах соединений – с гидроксидами и оксидами железа и марганца 73 % и 48 % соответственно. Следует отметить, что для Sr и Ba в максимальной степени накопление характерно в обменной форме. Для соединений Mn и Be отмечено высокое накопление в непрочно связанных слабо специфически сорбированных формах. При этом в значительной степени переходил в самые подвижные водорастворимые формы Mo (19 %) и Sr (4 %).



1 – водорастворимая, 2 – обменная, 3 – слабо специфически сорбированная, 4 – связанная с органическим веществом, 5 – связанная с оксидами и гидроксидами железа и марганца, 6 – остаточная

Рисунок 2. Формы соединений Sr (а) и Ba (б), Mn (в), Mo (г), Be (д) и U (е) в процентах от валового содержания

2.2 Формы нахождения Be, Mo и U в донных отложениях вдоль русла ручья Узынбулак

Рассмотрим подробнее распределение Be, Mo и U между различными формами соединений в донных отложениях, отобранных вдоль всего русла р. Узынбулак. Ранее проведенные исследования [4] показали превышение ПДК вышеперечисленных эле-

ментов в поверхностных водах ручья Узынбулак: по Be достигало 30 ПДК, по U – 4 ПДК, и по Mo – 2 ПДК (в весенний период у истока).

На рисунке 3 представлено изменение относительного содержания форм соединений Be в зависимости от расстояния от истока ручья.

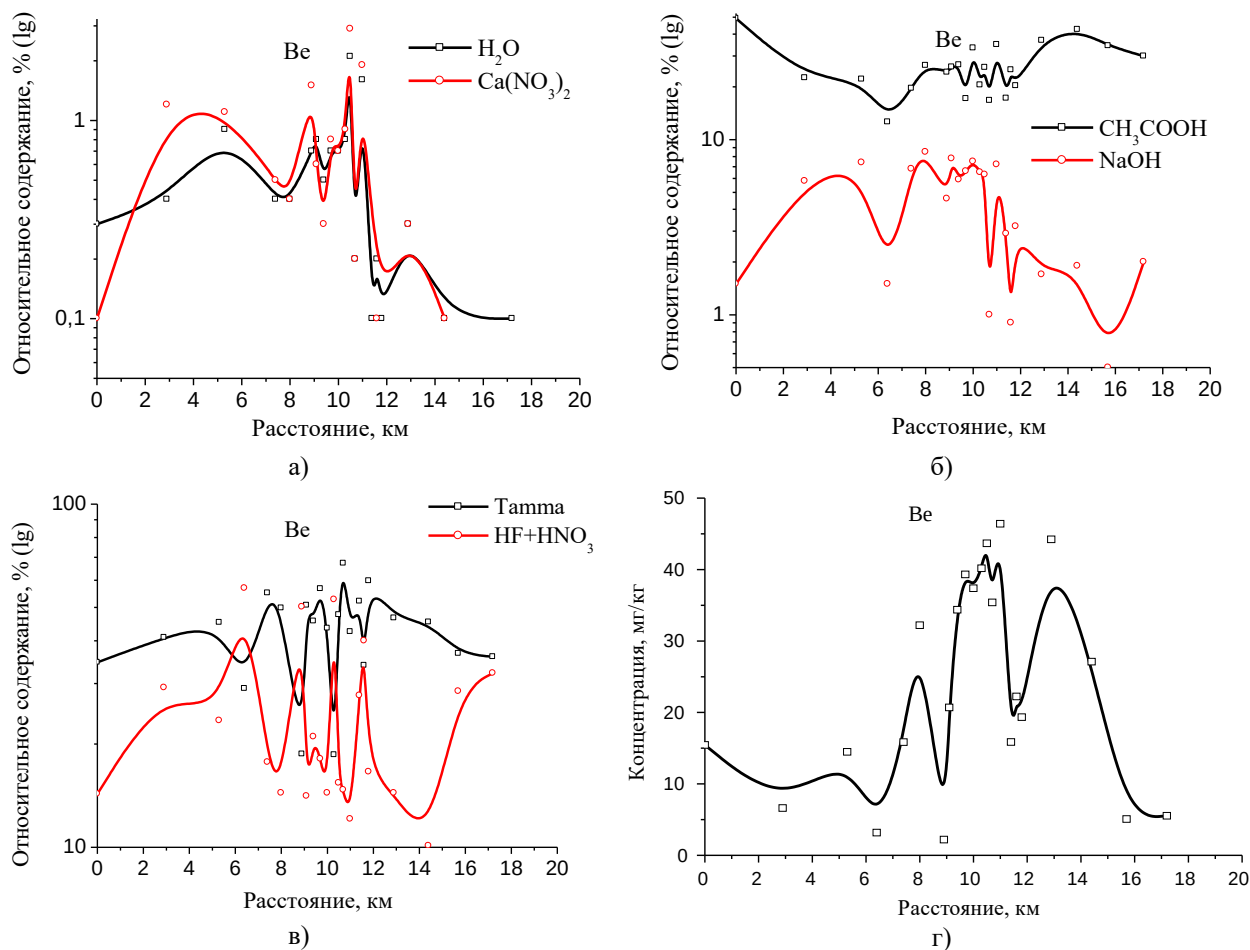


Рисунок 3. Распределение Be между различными формами соединений (% от валового содержания) (а, б, в) и изменение валового содержания Be (г) в донных отложениях вдоль русла р. Узынбулак

Из рисунка 3 видно одинаковое пространственное распределение водорастворимых и обменных форм соединений Be, доля их была минимальна – от 0,1 до 3 % от валового содержания. При этом следует отметить, что максимальное присутствие Be в наиболее подвижных формах наблюдалось на участке 10,5 – 11 км от истока ручья.

Установлено, что в максимальной степени Be поглощается оксидами и гидроксидами железа и марганца. Но особое внимание следует обратить на участок с 9 по 11 км от истока ручья, где выявлено максимальное накопление Be в форме, связанной с оксидами и гидроксидами железа и марганца. По всей видимости, это связано с окислительно-восстановительными процессами. Так на данном участке выявлены значительные колебания окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) – от -40 до $+50$ [14, 15].

Известно, что железо резко реагирует на изменение ОВП:

- в восстановительных (бескислородных) водах ионы железа находятся в форме Fe^{2+} , что в свою очередь определяет возможность их миграции в поверхностных водах ручья;

- в окислительных (содержащих кислород) водах ионы железа осаждаются в форме Fe^{3+} , в виде труднорастворимых минералов, которые в свою очередь образуют прочно поверхностные комплексы с бериллием.

Распределение Mo между различными формами соединений (% от валового содержания) в донных отложениях по руслу ручья представлено на рисунке 4.

Из графика видно, что содержание Mo возрастало более интенсивно в наиболее подвижной водорастворимой форме, в максимальной степени на участках от 9 до 11 км от истока. При этом отмечено относительное пониженное содержание в обменных и специфически сорбированных формах соединений. Особо следует отметить, что максимальное накопление Mo в органически связанной форме наблюдалось в устьевой части русла и достигало 50 % от валового содержания.

На рисунке 5 представлено изменение относительного содержания форм соединений U в зависимости от расстояния от истока ручья.

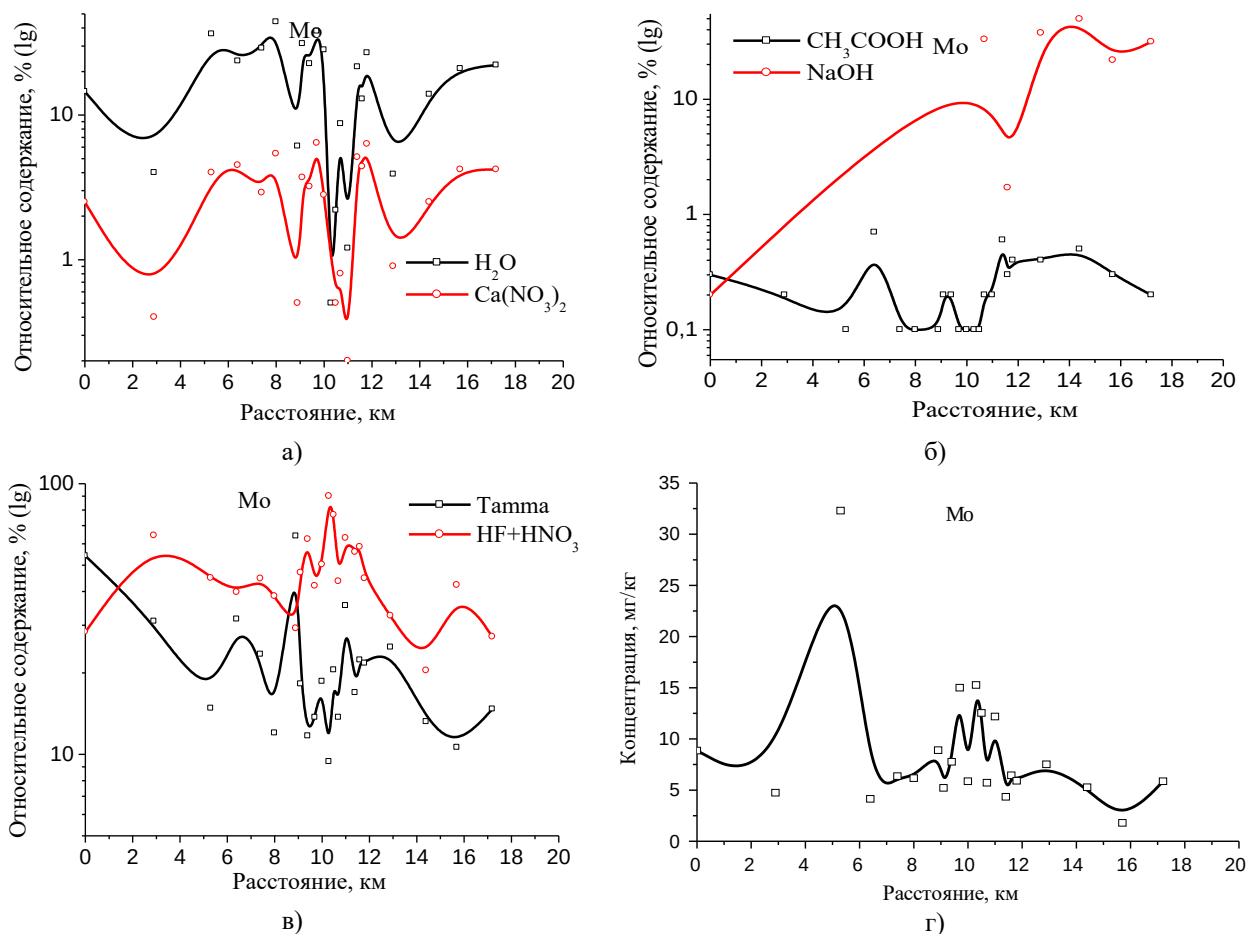


Рисунок 4. Распределение Мо между различными формами соединений (% от валового содержания) (а, б, в) и изменение валового содержания Мо (г) в донных отложениях вдоль русла р. Узынбулак

Из рисунка видно, что для U характерно максимальное накопление в прочно связанной форме – связанной с оксидами и гидроксидами железа и марганца (73 %). Данный элемент менее интенсивно накапливался в подвижных формах (водорастворимая и обменная фракция) - менее 2 %. Таким образом, U в донных отложениях находится в прочносвязанной форме и обладает низкой миграционной способностью. Наибольшее содержание U во всех исследуемых формах наблюдалось у истока ручья, и на отрезке от 9 по 11 км.

Основным вопросом после выявления повышенных содержаний U в донных отложениях ручья Узынбулак был вопрос о его происхождении – «Является ли уран природным или техногенным?». В таблице 4 представлены данные об изотопном составе урана в воде ручья, а также в водотоке шт. № 104, которая расположена в долине р. Узынбулак.

Изотопный состав урана указывает на его естественное происхождение, обусловленное геохимическим фоном горного массива Дегелен. Таким образом, высокое содержание урана имеет естественное

происхождение и обусловлено геохимическим фоном горного массива Дегелен [13].

Таким образом, накопление Be и U осуществлялось главным образом за счет взаимодействия с самыми устойчивыми компонентами – оксидами и гидроксидами Fe и Mn и остаточной формой. Бериллий и уран практически не переходили в водную вытяжку и обменную форму. Для Mo наблюдалась совсем другая картина. Данный элемент показал значительное накопление в наиболее подвижной водорастворимой форме, что составило 19 % от валового содержания.

Таблица 4. Изотопный состав урана (^{235}U и ^{238}U) в воде р. Узынбулак и водотоке шт. №104

№ проб	Точка отбора	Содержание урана, мкг/л	%	
			^{235}U	^{238}U
1	р. Узынбулак	30	$0,73 \pm 0,02$	$99,27 \pm 0,02$
2	Водоток штольни №104	1200	$0,72 \pm 0,02$	$99,28 \pm 0,02$

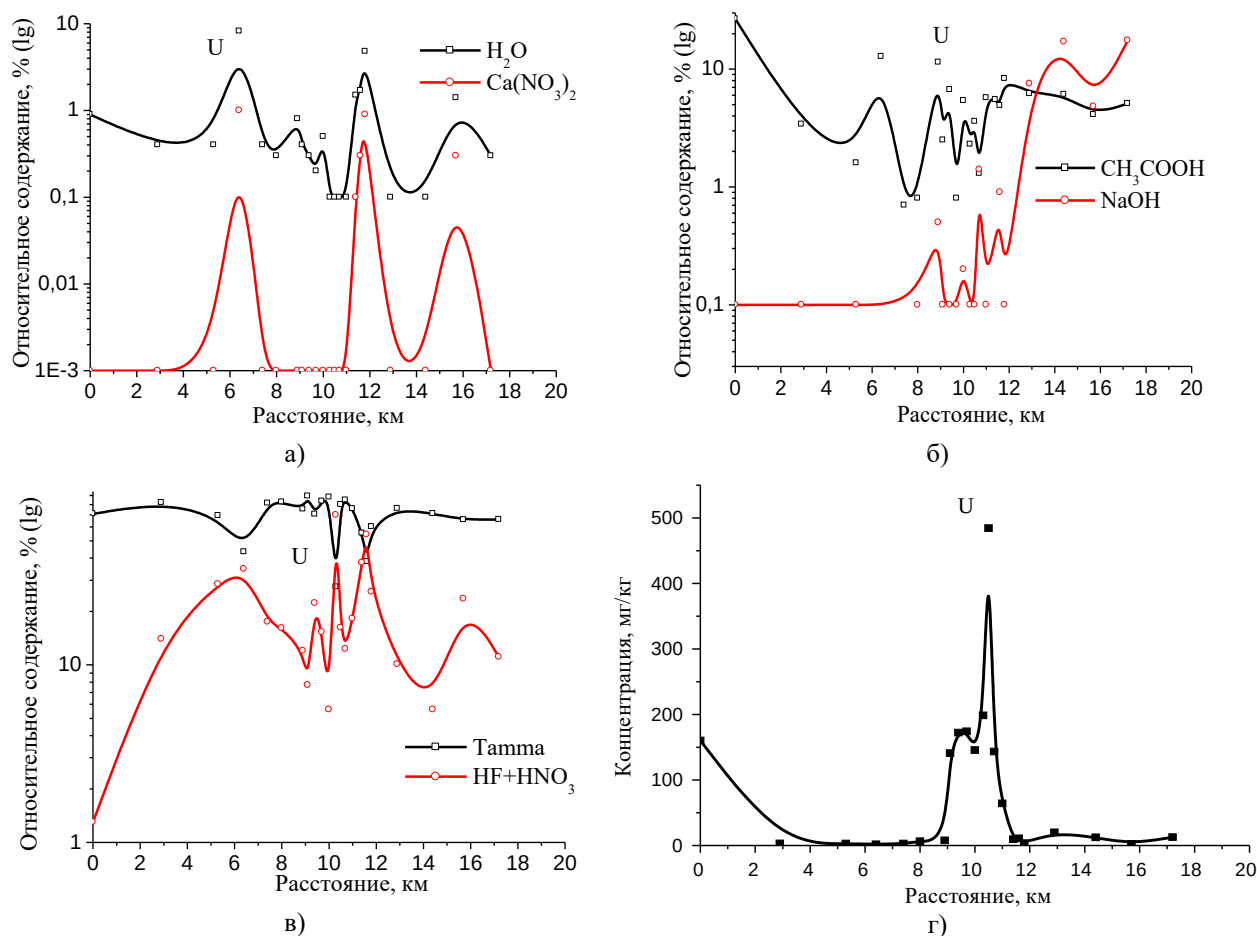


Рисунок 5. Распределение U между различными формами соединений (% от валового содержания) (а, б, в) и изменение валового содержания U (г) в донных отложениях вдоль русла р. Узынбулак

ВЫВОДЫ

Проведена оценка вариативности различных форм нахождения химических элементов в донных отложениях р. Узынбулак. Распределение форм нахождения исследуемых химических элементов отличается значительной неоднородностью, с разницей в несколько порядков. Например, изменение относительного содержания обменных форм соединений элементов в донных отложениях на протяжении всего русла р. Узынбулак находится в диапазоне: для Be от 0,1 % до 2,9 % (в 29 раз), для Mo от 0,04 % до 6,4 % (в 160 раз), для U от 0,1 % до 1 % (в 10 раз). Таким образом, содержание форм нахождения исследуемых элементов в пределах одной экосистемы характеризуется широким диапазоном данных и отличается значительной вариативностью.

В донных отложениях ручья показатели абсолютной концентрации форм химических элементов в большинстве случаев увеличиваются от наиболее легко извлекаемых к наиболее прочносвязанным с почвенными компонентами форм соединений: $X_{\text{Эводн}} < X_{\text{Эобм}} < X_{\text{Эорг}} < X_{\text{Эсп. сорб}} < X_{\text{Эост}} < X_{\text{Эокс/гидрокс Fe и Mn}}$.

Выявлены различия в распределении химических элементов между исследуемыми формами соединений в донных отложениях р. Узынбулак. Так, для вытяжек водной фазы отмечено достаточно высокий процент выщелачивания (% валового содержания) для следующих элементов: Mn, Sr и Mo – от 2 до 19 %. В обменной форме прослеживается увеличение содержания Sr (62 %), Ba (42 %) и Mn (23 %). Следует отметить, что для Mn, Sr и Ba выявлена максимальная степень накопления в обменной форме, что свидетельствует об их наибольшей миграционной способности и биодоступности.

Органическое вещество донных отложений относительно прочно удерживает такие элементы как Mn, Sr и Ba. Наибольшее накопление для U (73 %) и Be (48 %) происходило в устойчивых формах соединений – в форме, связанной с оксидами и гидроксидами железа и марганца. Доля извлечения в остаточную форму для Mo составила выше 50 %.

Более детально рассмотрена пространственная вариативность форм нахождения для элементов, превышающих ПДК в воде, на протяжении всего русла р. Узынбулак. Наибольшей способностью связываться с самыми устойчивыми компонентами дон-

ных отложений (оксидами и гидроксидами Fe и Mn и остаточной формой) обладает Be и U. Наибольшее содержание данных элементов во всех исследуемых формах наблюдалось на отрезке от 9 по 11 км. Для Mo значительное накопление зафиксировано в наиболее подвижной водорастворимой форме, что составило 19 % от валового содержания. При этом особо следует отметить, что максимальное накопление Mo в органически связанной форме наблюдалось в устьевой части русла и достигало 50 % от валового содержания. В целом, высокое содержание

исследуемых элементов в донных отложениях имеет естественное происхождение и обусловлено минералогическим составом почвообразующих пород горного массива Дегелен.

Работы выполнены при финансовой поддержке грантового финансирования министерства образования науки Республики Казахстан (5032/ГФ4 «Выявление механизмов формирования уровня загрязнения химическими токсикантами объектов водопользования бывшего Семипалатинского испытательного полигона»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование микроэлементного состава воды поверхностных водотоков горного массива Дегелен. Говенко П.В., Амиров А.А., Лукашенко С.Н., Кириллова Т.Г. Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2011–2012 г.] / под рук. С.Н. Лукашенко. Павлодар: Дом печати, 2013. Вып.4. – Т.2. – 474 с.
2. Мухамедияров Н.Ж., Койгельдинова М.Т., Кириллова Т.Г., Ташекова А.Ж. «Исследование механизмов формирования элементного состава компонентов экосистемы ручья Узынбулак», НИОКР молодых ученых и специалистов Национального ядерного центра Республики Казахстан Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» Республиканского государственного предприятия «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», 2015 год.
3. Исследование микроэлементного состава поверхностных вод Семипалатинского испытательного полигона // Койгельдинова М.Т., Лукашенко С.Н., Мухамедияров Н.Ж. // Биогеохимия химических элементов и соединений в природных средах: материал II Международной школы – семинара для молодых исследователей, посвященной памяти профессора В.Б. Ильина, г. Тюмень, 16–20 мая 2016, С. 243–250.
4. Общая характеристика физико-химических свойств и элементный состав поверхностных вод ручья Узынбулак // Лукашенко С.Н., Мухамедияров Н.Ж., Койгельдинова М.Т., Макарычев С.Т., Ташекова А.Ж. // Вестник Алтайского государственного аграрного университета №12 (146), декабрь, 2016, С. 74–80.
5. Элементный состав донных отложений ручья Узынбулак / Мухамедияров Н.Ж., Лукашенко С.Н., Койгельдинова М.Т., Макарычев С.В., Кириллова Т.Г. // Вестник Алтайского государственного аграрного университета №12 (146), декабрь, 2016, С. 80–86.
6. Формы соединений тяжелых металлов в основных типах почв Семипалатинского прииртышья при моно- и полиэлементном видах загрязнения // Калентьева Н.В. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук, РГКП Семипалатинский государственный педагогический институт, г. Семей, 2009 г.
7. Ильин В.Б., Сысо А.И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. – 229 с.
8. Рэуце К., Кырста С. Борьба с загрязнением почвы. М.: Агропромиздат, 1986. – 221 с.
9. Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами / под ред. Н.Г. Зырина, С.Г. Малахова. – М.: Гидрометеиздат, 1981. – 109 с.
10. Ладонин Д.В. Соединения тяжелых металлов в почвах – проблемы и методы изучения // Почвоведение. – 2002. – № 6. – С. 682–692.
11. Качество воды. «Применение масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС). Определение 62 элементов» (номер гос. регистрации 022/10505 от 23.09.2016г.): ISO 17294 - 2: 2003 (E). – Ч. 2.
12. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах / А.П. Виноградов. - М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 140 с.
13. Ю.С. Восель, В.Д. Страховенко, И.В. Макарова «Формы нахождения урана в озерных донных отложениях разного типа. Байкальский регион» // Материалы IV Международной конференции, г. Томск, 4–8 июня 2013г. – С. 130–134.
14. Общая характеристика физико-химических свойств и элементный состав поверхностных вод ручья Узынбулак // Лукашенко С.Н., Мухамедияров Н.Ж., Койгельдинова М.Т., Макарычев С.Т., Ташекова А.Ж. // Вестник Алтайского государственного аграрного университета №12 (146), декабрь, 2016, С. 74–80.
15. Мухамедияров Н.Ж., Койгельдинова М.Т. «Исследование вариативности микроэлементного состава компонентов экосистемы на примере водного объекта СИП», НИОКР молодых ученых и специалистов Национального ядерного центра Республики Казахстан Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» Республиканского государственного предприятия «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», 2017 год.

**ҰЗЫНБУЛАК бұл. ТҮПТІК ШӨГІНДІЛЕРІНЕН ХИМИЯЛЫҚ ЭЛЕМЕНТТЕРДІ
АНЫҚТАУДЫҢ ТҮРЛІ ФОРМАСЫНЫҢ ВАРИАТИВТІЛІГІН ЗЕРТТЕУ**

**Мұхамедияров Н.Ж., Қойгелдинова М.Т., Лукашенко С.Н.,
Есілқанов Ғ.М., Теміржанова А.Е., Шакенов Е.З.**

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

Бұл жұмыста, Ұзынбұлақ бұлағының түптік шөгінділерінен химиялық элементтерді анықтау формасының вариативтілігін зерттеу нәтижелері келтірілген. Көп жағдайда, элементтердің қосылу формасының абсолюттік шоғырлану көрсеткіштері жеңіл алынатыннан тығыз байланысқан топырақ құрауыштарының қосылу формаларына қарай ұлғаяды: $X_{\text{сұл}} < X_{\text{ауысп}} < X_{\text{орг}} < X_{\text{сін. кабл}} < X_{\text{қалд}} < X_{\text{окс/гидрокс Fe және Mn}}$. Айта кету керек, Mn, Sr және Ba үшін ауыспалы түрдегі жинақталудың максималды дәрежесі анықталған, бұл олардың жылыстау қабілетінің және биоқолжетімділігі туралы хабардар етеді.

Түптік шөгінділерде Be, Mo және U жылыстау қабілетіне бағалау жасалды, олардағы шоғырлану ШРШ жоғары екенін көрсетті. Түптік шөгінділерде ең тұрақты құрауыштар Be және U жоғары байланысу қабілетіне ие (оксидтер және гидроксидтер Fe мен Mn және қалдық формада). Аталған элементтердің максималды құрамы барлық зерттеліп жатқан формаларда 9 бастап 11 км дейінгі қимада байқалды.

Зерттеліп жатқан химиялық элементтерді анықтау формасының таралуы бірнеше есе айырмашылықпен едәуір түрде сан алуандығымен ерекшеленеді. Жалпы алғанда, түптік шөгінділерде зерттеліп жатқан элементтердің жоғары құрамының таралуы табиғи түрде және Дегелең таулы массивіндегі жыныста топырақ түзгіш минералогиялық құраммен шартталған.

Кілт сөздер: Семей сынақ полигоны, «Дегелең» алаңы, анықтау формасы, бірізді экстрагирлеу.

**RESEARCH INTO VARIABILITY OF DIFFERENT CHEMICAL ELEMENT SPECIATION
IN BOTTOM SEDIEMENTS IN UZYNBULAK STREAM**

**N.Zh. Muhamediyarov, M.T. Koigeldinova, S.N. Lukashenko,
G.M. Yesilkanov, A.Ye. Temirzhanova, Ye.Z. Shakenov**

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

This paper gives research findings into variability of different chemical element speciation in bottom sediments of Uzynbulak stream. In most cases factors of absolute concentration in forms of element compounds increase from the most easily extractable to the mosttoughtly bound forms with soil components of compound forms: $CE_{\text{water-soluble}} < CE_{\text{exchangeable}} < CE_{\text{org bound}} < CE_{\text{poorly spec.sorbed}} < CE_{\text{residual}} < CE_{\text{Fe and Mn oxide/hydr}}$. It should be noted that a maximum accumulation rate in exchangeable form has been identified for Mn, Sr and Ba which indicates their highest migration capacity and bioavailability.

Be, Mo and U migration abilities were assessed in bottom sediments, whose concentrations exceeded MAC. Be and U have the highability to bind with the most stable components of bottom sediments (Fe and Mn oxides and hydroxides and the residual form). Maximum content of these elements in all the forms of interest was observed in a 9 to 11 km section.

Speciation distribution of chemical elements of interest differ in significant non-uniformity of several orders of magnitude. On the whole, high content of elements of interest in bottom sediments is of natural origin and accounted for by mineralogical composition of mother rocks in Degelen mountain massif.

Key words: Semipalatinsk test site, "Degelen", speciation, sequential extraction.

УДК 662.6/.9.001.6

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА НА СТЕПЕНЬ НАГРЕВА ТЕПЛООБМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

¹⁾ Надырова А.Р., ¹⁾ Степанова О.А., ²⁾ Елистратов С.Л.

¹⁾ Государственный университет им. Шакарима города Семей, Семей, Казахстан

²⁾ Новосибирский Государственный технический университет, Новосибирск, Россия

В результате работы были изучены способы передачи теплоты в элементах энергетических котлов, исследована степень нагрева теплообменных поверхностей в зависимости от условий эксплуатации котельного агрегата. По данным тепловизионного оборудования были построены изотермические поверхности для фронтальной, правой и левой стенок топки котла при различных теплопроизводительностях.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с использованием традиционных источников энергии, ключевыми процессами при производстве тепловой и электрической энергии являются процессы горения топлива и теплообмена.

В топочном пространстве котельного агрегата имеет место сложный теплообмен, в который входят все его составляющие: излучение, конвекция и теплопроводность. Эти три вида теплообмена в чистом виде встречаются очень редко. В большинстве случаев один вид сопровождается другим. Примером этого может служить передача теплоты от газообразных продуктов сгорания к стенке водогрейного котла (рисунок 1). Слева поверхность ее соприкасается с горячими газообразными продуктами сгорания и имеет температуру t_1 , справа омывается водой и имеет температуру t_2 . Температура в стенке снижается в направлении оси x .

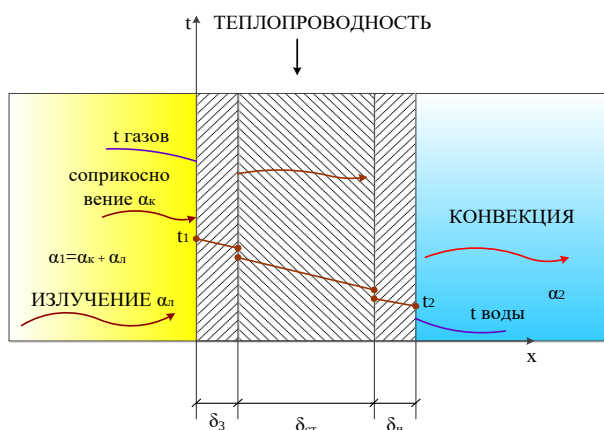


Рисунок 1. Передача теплоты от газообразных продуктов сгорания к стенке водогрейного котла

В данном случае теплота от газа к стенке передается одновременно путем конвекции, теплопроводности и излучением (лучистый теплообмен). Результат одновременного действия отдельных элементарных явлений приписывают одному из них, которое и считают главным. Так, радиация (излучение), называемая еще прямой отдачей, в передаче теплоты в топочной камере от топочных газов к внешней поверхности нагрева котла играет главенствующую

роль, хотя наряду с ней в передаче теплоты участвуют и конвекция, и теплопроводность [1, 2]. Способы передачи теплоты от внешней поверхности нагрева к внутренней через слой сажи, металлическую стенку и слой накипи осуществляются только путем теплопроводности. Наконец, от внутренней поверхности нагрева котла к воде теплота передается только конвекцией [3].

В газоходах котла процесс теплообмена между стенкой секции и омывающими ее газами также является результатом совокупного действия конвекции, теплопроводности и радиации. Однако в качестве основного явления принимается конвекция [2, 3, 4].

Исследование степени нагрева поверхности котла в зависимости от производительности проводилось на котлоагрегате КВ-Т-116,3-150 с помощью тепловизионного оборудования IRTIS-2000 (рисунок 2).

Принцип работы IRTIS-2000 основан на сканировании температурного излучения в поле зрения камеры оптико-механическим сканером с одноэлементным высокочувствительным инфракрасным приемником и трансформации этого излучения в электрический сигнал аналого-цифровым преобразователем. Камера содержит зеркально-линзовую оптику с малым количеством отражающих поверхностей, что уменьшает потери оптической системы и упрощает ее настройку. Основные технические данные инфракрасной камеры IRTIS-2000 представлены в таблице [5].

Тепловизор на термограмме фиксирует тепловой поток, передаваемый инфракрасным излучением. Программа обработки информации интерпретирует снимок исходя из установленных в нее параметров (степень серости материала снимаемой поверхности, расстояние до объекта, качество поверхности и др.).

По результатам полученных данных были построены изотермические поверхности для фронтальной, правой и левой сторон топки [6, 7]. Топка котельного агрегата вертикальная открытого типа, призматической формы. Пылеугольные горелки установлены на боковых стенах вблизи углов топки на отметке +8400 мм.

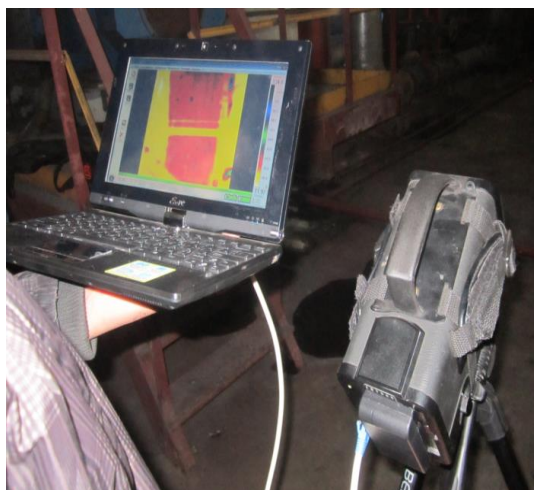


Рисунок 2. Тепловизор IRTIS-2000, охлаждаемый жидким азотом

Таблица. Основные технические данные инфракрасной камеры IRTIS-2000

Технические данные	Параметры
Диапазон измеряемых температур	-20...+2000 °C
Температурное разрешение	0,05 °C
Погрешность измерения по АЧТ	1,0 °C
Тип охладителя	жидкий азот
Разрешение по горизонтали	640 элементов в строке
Разрешение по вертикали	480 строк
Время формирования кадра	0,8; 1,6; 3,2 сек.
Время работы на одной заправке жидким азотом (150 мл)	6 часов
Влажность при работе	30÷80 %
Размеры камеры	200×140×100 мм

Характер распределения температур при производительности 55, 60, 75÷80 Гкал/ч представлен на рисунках 3, 4 и 5.

На рисунках наглядно видно равномерное распределение температур при небольшой теплопроизводительности в области горелок и по мере удаления от них. На уровне горелок максимальная температура фронтальной стенки составила 1530 °C, правой стенки 1518 °C, левой стенки 1520 °C. С ростом производительности наблюдается «вытягивание» факела правой горелки фронтальной стенки топки котла.

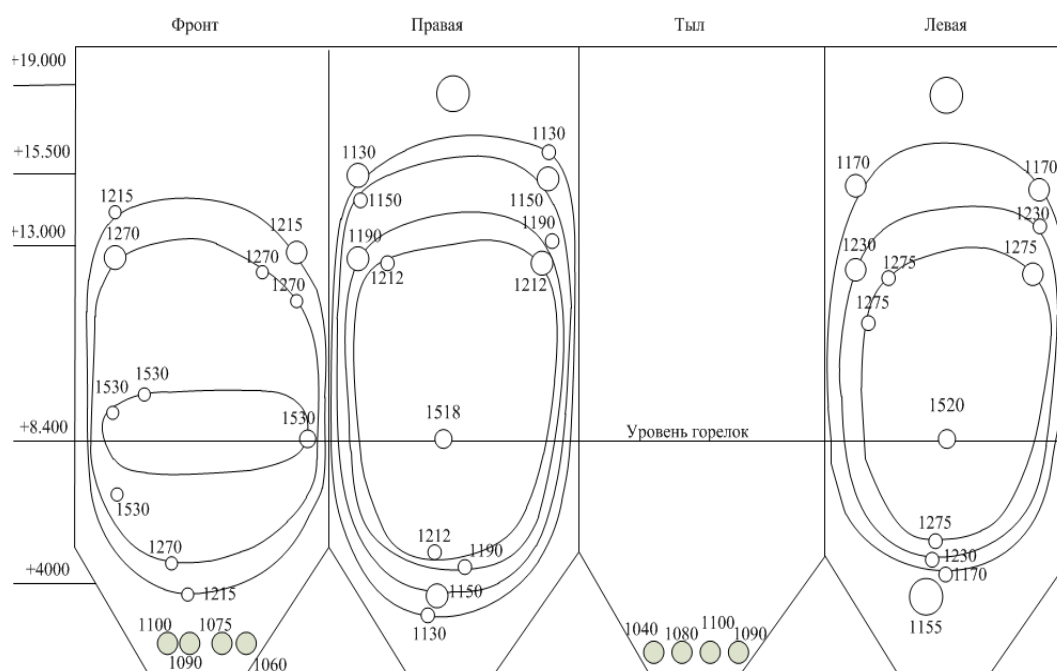


Рисунок 3. Изотермические поверхности при производительности 55 Гкал/ч.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА НА СТЕПЕНЬ НАГРЕВА ТЕПЛООБМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

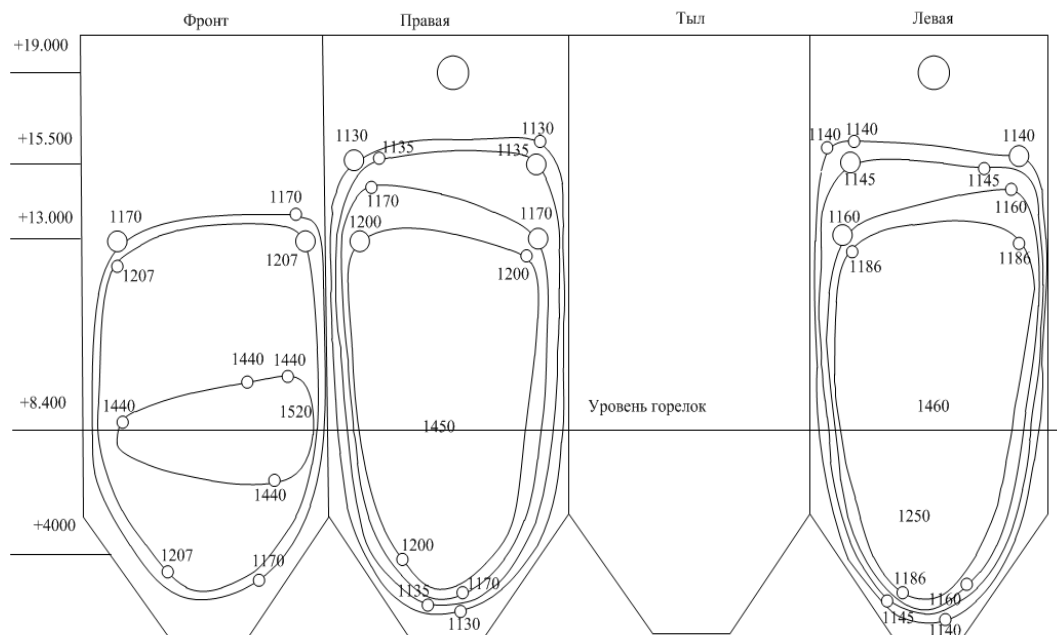


Рисунок 4. Изотермические поверхности при производительности 60 Гкал/ч.

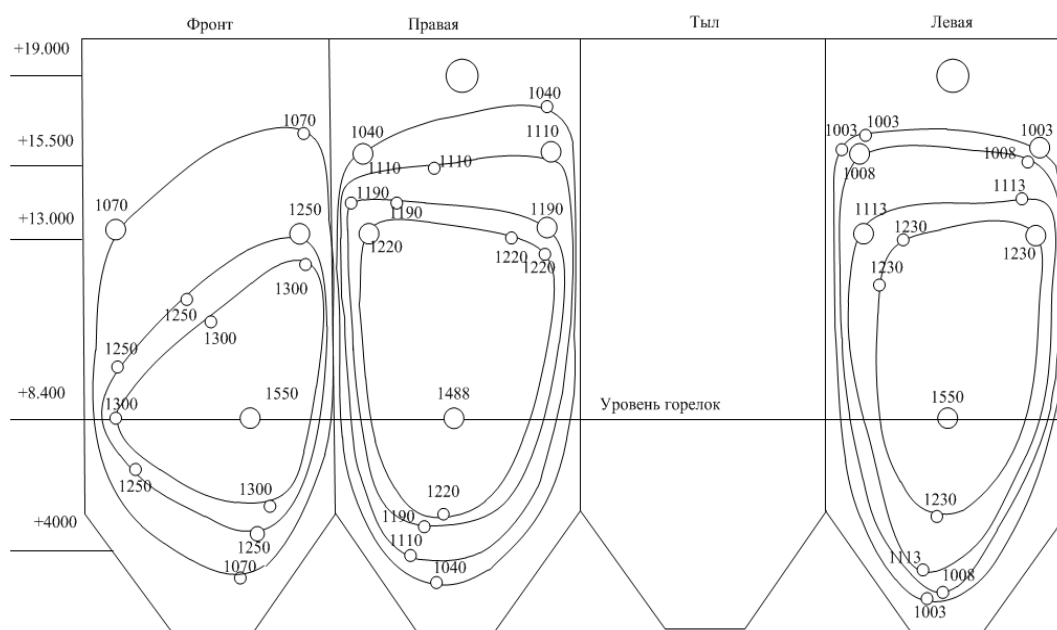


Рисунок 5. Изотермические поверхности при производительности 75÷80 Гкал/ч.

При теплопроизводительности 60 Гкал/ч на уровне правой горелки фронтальной стенки котла зафиксирована максимальная температура 1520 °С, левой горелки 1440 °С, правой стенки 1450 °С, левой стенки 1460 °С. При теплопроизводительности 75÷80 Гкал/ч на уровне правой горелки фронтальной стенки котла зафиксирована температура 1550 °С, левой горелки 1300 °С, правой стенки 1488 °С, левой стенки 1550 °С.

Анализ полученных данных свидетельствует о необходимости регулировки и корректировки работы горелок при высокой теплопроизводительности. Следует стремиться к обеспечению симметричного

распространения факела для предупреждения или сведения к минимуму температурных перекосов в топке. Повышение эффективности теплообмена достигается путем конструктивных изменений оборудования, применения новых материалов, выбора оптимальных режимов работы оборудования, совершенствования процесса производства.

Исходя из вышеизложенного, можно выделить следующие преимущества исследования температурных полей топочного пространства посредством тепловизионного оборудования:

- возможность получения достоверной информации о состоянии исследуемого объекта в реальном времени;
- отсутствие механического контакта с высокотемпературными средами;
- отсутствие воздействия на измеряемое поле температур объекта;
- возможность определения внутренних дефектов объектов по измерениям температурного поля на их поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исаченко, В.П. Теплопередача: учебник для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
2. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика: учеб. пособие для студентов вузов / В.Н. Богословский. – СПб.: НП «АВОК» Северо-Запад, 2006. – 400 с.
3. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена. - Изд. 5-е перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.
4. Лариков, Н.Н. Теплотехника: учебник для вузов / Н.Н. Лариков. – М.: Стройиздат, 1985. – 432 с.
5. Тепловизор ИРТИС-2000 С // URL: <http://www.irtis.ru/prod5.html>
6. Построение изотермических поверхностей // URL: <http://msd.com.ua/svarochnye-deformacii-i-napryazheniya/postroenie-izotermicheskikh-poverkhnostej>
7. Построение изотермических поверхностей // URL: http://studopedia.ru/2_28919_temperaturnoe-pole-izotermicheskaya-poverkhnost.html

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сложный теплообмен в топках котлоагрегатов малоизучен в связи со сложностями его расчета. Исследование процесса теплообмена в теплоэнергетическом оборудовании открывает перспективы по его совершенствованию, повышению производительности, надежности, ресурсосбережению и энергоэффективности.

ҚАЗАНДЫҚ АГРЕГАТТЫҢ ПАЙДАЛАНУ ШАРТТАРЫНЫҢ ЖЫЛУ АЛМАСУ БЕТТЕРІНІҢ ҚЫЗУ ДӘРЕЖЕСІНЕ ӘСЕРІ

¹⁾Надырова А.Р., ¹⁾Степанова О.А., ²⁾Елистратов С.Л.

¹⁾ Семей қаласының Шәкәрім атындағы Мемлекеттік университеті, Семей, Қазақстан

²⁾ Новосибирлік Мемлекеттік техникалық университеті, Новосибир, Ресей

Жұмыс нәтижесінде энергетикалық қазандардың элементтеріндегі жылу беру тәсілдері зерттелді, қазандық агрегатының пайдалану шарттарына байланысты жылу алмасу беттерінің қыздыру дәрежесі зерттелген. Тепловизор арқылы алған нәтижелер бойынша қазанның жану жерінің фронттік, сол жақ және он жақтардың изотермиялық беттері салынды.

INFLUENCE OF OPERATING CONDITIONS OF BOILER UNIT ON THE DEGREE OF HEATING OF HEAT EXCHANGE SURFACES

¹⁾ A. Nadyrova, ¹⁾ O. Stepanova, ¹⁾ S. Elistratov

¹⁾ Shakarim State University of Semey, Semey, Kazakhstan

²⁾ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

As a result of the work, the methods of heat transfer in the elements of power boilers were studied, the degree of heating of the heat exchange surfaces was investigated depending on the operating conditions of the boiler unit. According to the thermal analysis were constructed isothermal surface for front, right and left walls of the boiler furnace at various thermal productivity.

УДК 621.577

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ПАРОКОМПРЕССИОННОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСА

¹⁾Тоимбаев А.Б., ¹⁾Саматов Е.Б., ¹⁾Ермоленко М.В., ²⁾Елистратов С.Л.

¹⁾Государственный университет им. Шакарима города Семей, Семей, Казахстан

²⁾Новосибирский Государственный технический университет, Новосибирск, Россия

В результате работы был разработан экспериментальный стенд для моделирования режимов работы теплового насоса, получена зависимость коэффициента преобразования теплового насоса от температуры низкопотенциального источника энергии и построена диаграмма целесообразности применения теплового насоса в системе теплоснабжения.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время поиск и активное использование новых альтернативных источников энергии во многих развитых странах мира приняты в качестве жизненно важных, стратегически необходимых ресурсов, обеспечивающих перспективное развитие экономик этих стран. Прогнозируется, что доля альтернативной энергетики (солнечной, ветряной, приливной, гелиоэнергетики и т.п.) в мировом энергопотреблении будет ежегодно возрастать и к 2030 году составит 30 %, к 2050 году – 50 %. Однако, несмотря на многообещающие результаты, альтернативные источники энергии пока еще не нашли на уровень оптимального соответствия ожиданиям массового потребителя.

Нетрадиционная энергетика – динамично развивающаяся, хорошо продуманная технология, потенциал которой непрерывно увеличивается – способна сделать заметный вклад в мировой энергетический рынок. В развитии экологически чистых технологий производства электроэнергии заинтересованы все. Одним из таких источников энергосберегающих методов, снижающих загрязнение окружающей среды, дающих возможность экономить органическое топливо, удовлетворять нужды потребителей в технологическом тепле является применение теплонасосных технологий производства теплоты.

На пороге вступления Казахстана в ВТО экономика республики характеризуется сырьевой направленностью и высоким потреблением топливно-энергетических ресурсов. Высокая энергоемкость экономики по сравнению с развитыми странами мира приводит к нерациональному использованию топливно-энергетических ресурсов, снижает конкурентоспособность экономики, и, как следствие, приводит к существенному загрязнению окружающей среды, в том числе парниковыми газами, оказывающими влияние на глобальное потепление климата.

Наряду со значительными запасами ископаемого органического топлива Республика Казахстан обладает и обширными запасами возобновляемых ресурсов и источников энергии (солнечной, ветровой, гидравлической, геотермальной, энергии биомассы и ТБО, водородной и др. альтернативной энергетики). Техни-

ческий потенциал возобновляемых ресурсов и источников энергии только по ветру составляет около 1 820 млрд. кВт·ч в год, что в 25 раз превышает объем потребления всех топливно-энергетических ресурсов Республики Казахстан, а экономический потенциал определен более чем в 110 млрд. кВт·ч, что в 1,5 раза больше годового внутреннего потребления энергоресурсов в Республики Казахстан [1].

В этой связи, вопросы эффективного использования возобновляемых ресурсов рассматриваются как задача на будущее, в том числе дано поручение Президента Республики Казахстан о необходимости выработки Правительству подходов к решению этой проблемы [2].

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Данная работа является актуальной, так как отвечает направлению государственной программы по развитию электроэнергетики и повышению энергоэффективности в Республике Казахстан. Актуальность и своевременность проведения таких работ обоснована не только внутренними программами и задачами по модернизации Казахстана, но и мировыми тенденциями в области энергетики и охраны окружающей среды.

Тепловой насос является одним из эффективных энергосберегающих методов, дающих возможность экономить органическое топливо, снижать загрязнение окружающей среды, удовлетворять нужды потребителей в технологическом тепле является применение теплонасосных технологий производства теплоты.

Постоянное увеличение стоимости производства топливно-энергетических ресурсов, истощение не возобновляемых источников топлива и экологические последствия его сгорания увеличивается с каждым годом. Необходимость нагреть жилье и промышленных объектов, более жесткие требования по экологической очистке производственных процессов и охраны окружающей среды привели к поиску более эффективных энергосберегающих и экологически безопасных оборудования.

Применение теплонасосных технологий является одним из эффективных энергосберегающих способов, дающих возможность экономить органическое

топливо, снизить загрязнение окружающей среды, удовлетворить нужды потребителей в технологическом тепле.

При строительстве жилья в районах со слабо развитой инфраструктурой применение тепловых насосов является принципиально новым решением проблемы теплоснабжения и позволяет в зависимости от сезона и условий работы достигать максимальной эффективности, так как они могут быть встроены и в существующие системы отопления и горячего водоснабжения, а также одновременно может служить источником для системы кондиционирования.

Цель работы: Определение эффективности работы теплового насоса в зависимости от эксплуатационных условий.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Тепловой насос можно использовать практически в любых теплотехнологиях, но не всегда это дает необходимый экономический эффект, а в некоторых случаях и вовсе не рентабельно. Это зависит от ряда факторов, таких как температура низкопотенциального источника энергии, холодопроизводительности компрессора, коэффициента трансформации и цена на электроэнергию в регионе.

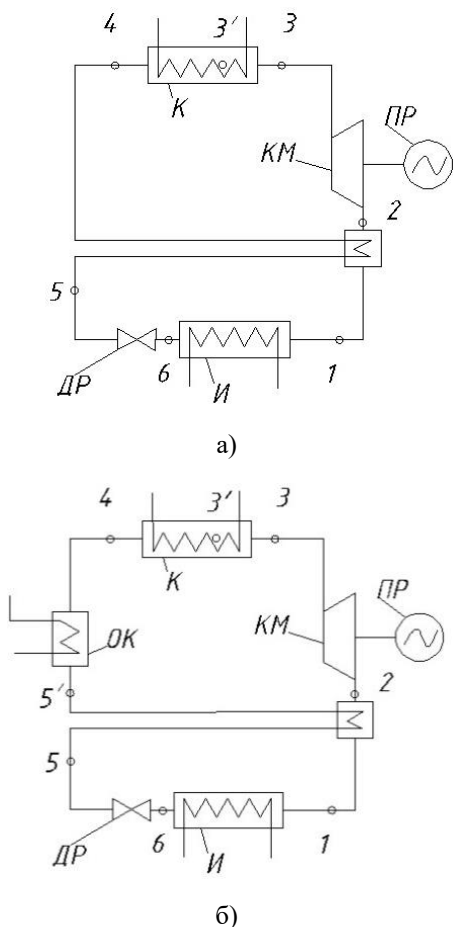


Рисунок 1. Принципиальная схема парокомпрессионного теплового насоса, (а) для теплоснабжения, (б) для теплоснабжения и горячего водоснабжения

Для исследования эффективности теплового насоса при различных режимах работы была разработана экспериментальная установка для проведения опытов, позволяющая моделировать температуру низкопотенциального источника и мощность компрессоров.

Стенд состоит из параллельно включенных ТН на базе поршневых компрессоров марок ФГрВ-1,75 и ФГрВ-2,8 с установочной холодопроизводительностью 1500 ккал/ч и 2500 ккал/ч соответственно. Температуру низкопотенциального теплоносителя моделировали при помощи ТЭНов, подключенных к автоматическому контролеру температуры STC-8080. Контроль температуры по циклу теплового насоса осуществляется при помощи термометров сопротивления с передачей значений на персональный компьютер.

Наибольшее распространение среди ПКТН получили машины, в которых реализуется обратный цикл Ренкина (см. рис. 1–2).

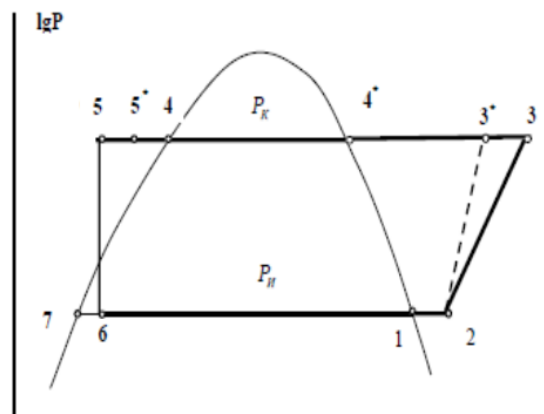


Рисунок 2. Термодинамический цикл парокомпрессионного теплового насоса в координатах «давление P – энтальпия h »

РАСЧЕТ ЦИКЛА

В качестве рабочего тела для поршневого компрессора теплового насоса используем озонобезопасный хладагент R-134a, широко применяемый в настоящее время в холодильной технике взамен запрещенного для серийного производства озоноразрушающего R-12. В ходе экспериментов изменялась температура низкопотенциального теплоносителя T_{s1} , а для теплоносителя системы отопления температура поддерживалась $T_{w2} = 335 \text{ K}$ ($+62 \text{ }^\circ\text{C}$). Эти температуры определяют близкий к предельному техническому режиму работы для выбранного рабочего тела и типа поршневого компрессора. Принимаем конечные разности температур на выходе из теплообменных аппаратов: в испарителе $\Delta T_{\text{и}} = T_{s2} - T_0 = 3 \text{ K}$; в конденсаторе $\Delta T_{\text{к}} = T_{\text{к}} - T_{w2} = 5 \text{ K}$. Для поршневого компрессора марки ФГрВ-1,75 приняты в соответствии с техническими данными фирмы-производителя следующие значения показателей: коэффициент вредного пространства компрессора $\epsilon = 0,03$; элект-

ромеханический КПД компрессора $\eta_{эл/м} = 0,95$. Для определения термодинамических свойств РТ используем удобную для практической работы инженерную программу Coolpak, содержащую данные о термодинамических и теплофизических свойствах широкого спектра хладагентов искусственного и естественного происхождения.

В процессе проведения экспериментов осуществлялся контроль температур на входе и выходе в испаритель, конденсатор и компрессор до момента стабилизации температуры нагреваемой воды. Опыты проводились при разных температурах низкопотенциального источника энергии. На основании полученных экспериментальных данных был произведен расчет термодинамического цикла, представленный в таблице.

В результате анализа полученных данных расчета был построен график изменения коэффициента преобразования теплоты теплового насоса ϕ от температуры низкопотенциального источника T_{s1} (ри-

сунк 3) и получены уравнения (формула 1 для теплоснабжения и ГВС, 2 для теплоснабжения).

$$\phi = 0,079 T_{s1} + 4,106 \quad (1)$$

$$\phi = 0,062 T_{s1} + 2,7913 \quad (2)$$

Из полученных величин расчета и построенного графика, представленного на рисунке 3 видно, что коэффициенты преобразования теплового насоса увеличивается с ростом температуры низкопотенциального источника энергии и намного больше при использовании установки не только на теплоснабжение, но и горячее водоснабжение параллельно с теплоснабжением.

На основании мониторинга температуры наружного воздуха и рекомендуемых комфортных параметров внутреннего воздуха с учетом теплопотерь через ограждающие конструкции здания была построена диаграмма целесообразности применения тепловых насосов (рисунок 4).

Таблица

	Теплоснабжение			Теплоснабжение и ГВС		
Температура низкопотенциального источника T_{s1} , °C	3	8	13	3	8	13
Степень сжатия рабочего тела в компрессоре π_k	7.27	6.05	5.1	7.27	6.05	5.1
Коэффициент подачи компрессора λ	0.66	0.7	0.73	0.66	0.7	0.73
Удельная внутренняя работа компрессора l_n , кДж/кг	54,47	48,2	42,75	54,47	48,2	42,75
Удельная теплопроизводительность конденсатора q_k , кДж/кг	164.09	159.97	156.75	164.09	159.97	156.75
Удельная тепловая нагрузка охладителя конденсата $q_{ок}$, кДж/кг	—	—	—	76,35	71,66	67,48
Коэффициент преобразования теплового насоса ϕ	2.86	3.15	3.48	4,19	4,57	4,99

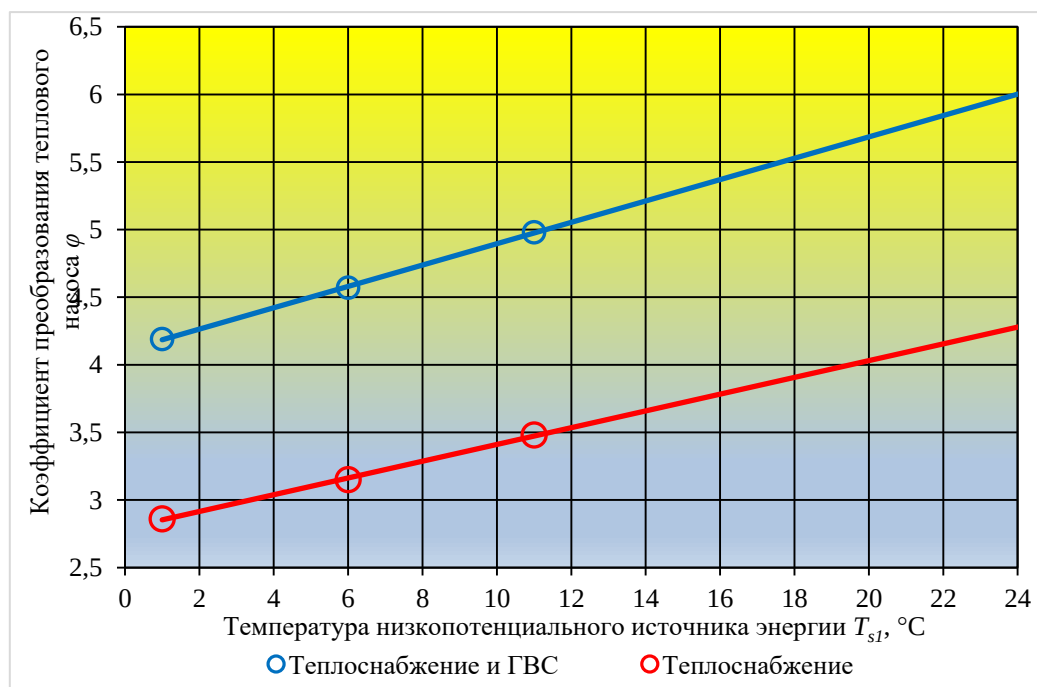


Рисунок 3. Зависимость коэффициента преобразования теплоты теплового насоса ϕ от температуры низкопотенциального источника T_{s1}

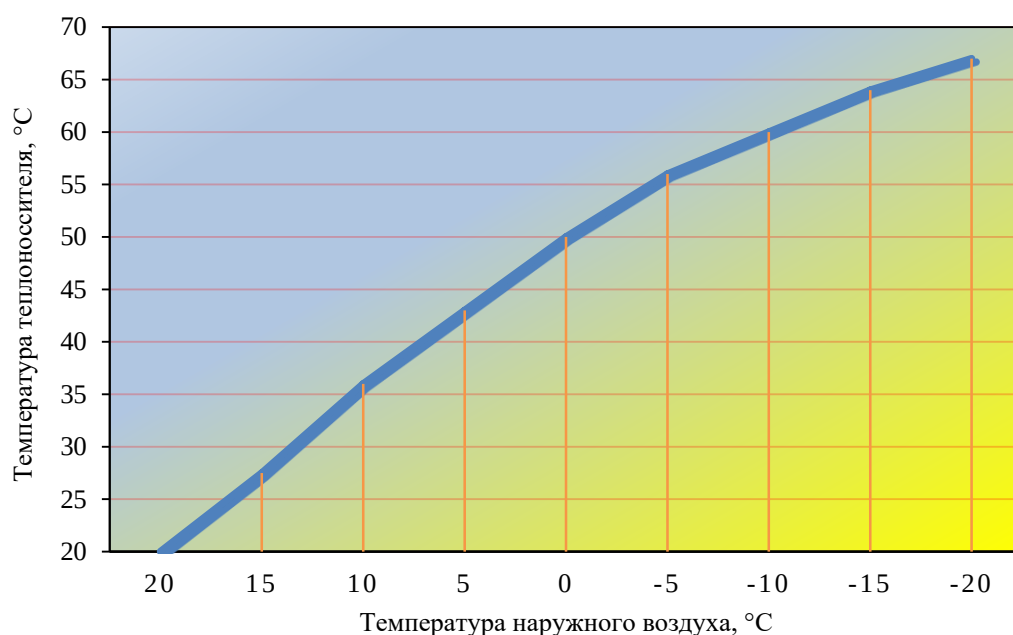


Рисунок 4. Диаграмма целесообразности применения теплового насоса в системе теплоснабжения

Анализ диаграммы (рисунок 4) показал, что тепловой насос можно использовать в системе теплоснабжения жилого здания для получения рекомендуемых комфортных параметров внутреннего воздуха при температуре наружного воздуха до минус 20 °C, а при температуре наружного воздуха ниже минус 20 °C требуется дополнительная мощность для отопления.

ВЫВОДЫ

Исходя из результатов экспериментальных исследований, можно сделать следующие выводы:

1. Коэффициент преобразования теплоты возрастает с увеличением температуры низкопотенци-

ального источника и уменьшением разности температуры конденсации и низкопотенциального источника, т.е. чем меньше отличаются температуры источника и приемника теплоты, тем выше коэффициент преобразования.

2. Тепловой насос можно использовать в системе теплоснабжения жилого здания для получения рекомендуемых комфортных параметров внутреннего воздуха при температуре наружного воздуха до минус 20 °C, а при температуре наружного воздуха ниже минус 20 °C требуется дополнительная мощность для отопления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Статистический сборник «Топливо-энергетический баланс Республики Казахстан за 2000–2004 годы», Алматы 2005, Агентство Республики Казахстан по статистике.
2. Проект «Программы эффективного и рационального использования возобновляемых источников энергии» - Поручение Президента Республики Казахстан Правительству от 28 августа 2006 года № 3392
3. В. Г. Горшков Тепловые насосы. Аналитический обзор //Справочник промышленного оборудования, 2004, № 2.
4. Bailer, P., Pietrucha, U. District heating and district cooling with large centrifugal chiller – heat pumps // Proc. 10th Int. Symp. on District Heating and Cooling. (Hanover, Germany. 3–5 September 2006).
5. Касымов А. Б. Магистерская диссертация «Повышение тепловой эффективности тэс на основе использования инновационных энергосберегающих технологий» 2012 г.–89 с
6. Елистратов С. Л. Комплексное исследование эффективности тепловых насосов: дис. ... д-р техн. наук: 01.04.14. – Новосибирск, 2010.

**БУКОМПРЕССОРЛЫҚ ЖЫЛУЛЫҚ СОРҒЫНЫҢ ЭФФЕКТИВТІ ЖҰМЫСЫНА
ЭКСПЛУАТАЦИЯЛЫҚ ЖАҒДАЙЛАРДЫҢ ӘСЕРІ**

¹⁾ Тоимбаев А.Б., ¹⁾ Саматов Е.Б., ¹⁾ Ермоленко М.В., ²⁾ Елистратов С.Л.

¹⁾ Семей қаласының Шәкәрім атындағы Мемлекеттік университеті, Семей, Қазақстан

²⁾ Новосибирлік Мемлекеттік техникалық университеті, Новосибир, Ресей

Жұмыс нәтижесінде жылулық сорғының жұмыс режимдерін модельдеу үшін эксперименттік стенд әзірленді, төмен потенциалды энергия көзінің температурасынан жылулық сорғыны түрлендірудің тәуелділік коэффициенті анықталды және жылумен қамтамасыз ету жүйесінде жылулық сорғыны пайдаланудың диаграммасы тұрғызылды.

**INFLUENCE OF OPERATING CONDITIONS ON THE EFFICIENCY
OF VAPOR COMPRESSION HEAT PUMP SYSTEM**

¹⁾ A.B. Toymbaev, ¹⁾ Ye.B. Samatov, ¹⁾ M.V. Yermolenko, ²⁾ S.L. Yelistratov

¹⁾ Shakarim State University of Semey, Semey, Kazakhstan

²⁾ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

As a result of the work, developed the experimental stand for modeling the operation modes of the heat pump, obtained the dependence of the heat pump conversion coefficient on the temperature of the low-potential energy source and created the diagram of the feasibility of using a heat pump in the heat supply system.

УДК 910.4:551.31(528.4)

ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ И РЕЛЬЕФ ТЕРРИТОРИИ ПРОЕКТИРУЕМОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПРИРОДНОГО РЕЗЕРВАТА «БОКЕЙОРДА» ЗАПАДНО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Салихов Т.К., Салихова Т.С., Берденов Ж.Г.

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Исследования выполнялись в рамках проекта Правительства Республики Казахстан и Глобального экологического фонда Программой развития Организации Объединенных Наций (ПРООН) «Сохранение и устойчивое управление степными экосистемами», направленного на увеличение степных экосистем. В результате исследований геоэкологическое проектируемого государственного природного резервата «Бокейорда» Западно-Казахстанской области проведен анализ географическое положение и рельеф местности. На основе экосистемного анализа и ГИС-технологии определены границы резервата, проведено зонирование функциональных участков и проанализировано современное состояние географического положения, рельефа местности и составлены карты исследуемой территории.

Ключевые слова: государственный природный резерват, макрорельеф, мезорельеф, микроположение, микроположение, микрорельеф, мезорельеф и морфоструктура территории.

ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть естественных степных пространств на Земле находится в Казахстане, которые составляют свыше 120 млн. га. В свою очередь степные экосистемы Казахстана являются местами распространения уникального растительного мира степей, глобально исчезающих видов степной фауны. Степи являются наименее защищенным типом экосистем в Казахстане, и крайне недостаточно представлены в системе особо охраняемых природных территорий (ООПТ).

В настоящее время система особо охраняемых природных территорий Западно-Казахстанской области представлена 3-мя государственными природными заказниками республиканского значения и 7 ООПТ областного значения, суммарная площадь которых составляет 188,7 тыс.га или 1% от всей площади области. Вместе с тем, в области отсутствуют ООПТ со строгим режимом охраны и со статусом юридического лица [1].

Вместе с тем, в области отсутствуют ООПТ со строгим режимом охраны и со статусом юридического лица. Работа по созданию государственного природного резервата «Бокейорда» выполняется в рамках проекта Правительства Республики Казахстан и Глобального экологического фонда Программой развития Организации Объединенных Наций «Сохранение и устойчивое управление степными экосистемами», направленного на увеличение степных ландшафтов в системе особо охраняемых природных территорий Казахстана.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель наших исследований – изучение современного состояния географического положения и рельефа геоэкологическое Волго-Уральском междуречье и разработка научного обоснования для создания государственного природного резервата «Бокейорда» Западно-Казахстанской области для сохранения

мест обитания редких и эндемичных видов биоразнообразия.

Организация резервата в местах обитания уральской популяции сайгаков особенно актуально после случая массовой гибели от пастереллеза 12 тысяч особей в мае 2010 года и более 400 особей в мае 2011 года в результате численность популяции сократилась с 39 тыс. до 27 тыс. особей [2].

Комитетом лесного хозяйства и животного мира Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан принята Программа по развитию научно-исследовательских работ по сохранению биологического разнообразия, в рамках которой предусмотрены работы по созданию государственного природного резервата «Бокейорда». Исследования выполнялись в рамках проекта Правительства Республики Казахстан и Глобального экологического фонда Программой развития Организации Объединенных Наций (ПРООН) «Сохранение и устойчивое управление степными экосистемами», направленного на увеличение степных экосистем.

В связи с этим в исследованиях на западе Западно-Казахстанской области, географически в бассейне рек Малого Узень и Ащыозек, на пространстве Волго-Уральского междуречья, в северо-западной части Прикаспийской низменности в пределах территории Жанибекского, Казталовского и Бокейординского районов (рисунок 1) на полого-плоской и слабоволнистой равнине был проведен анализ географическое положение и изучен рельеф местности геоэкологическое по общепринятым методикам [3–6].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проектируемая территория расположена на западе Западно-Казахстанской области в пределах территории Жанибекского, Бокейординского, Казталовского районов. Общая площадь исследованного региона составляет 690,929 тыс. га или около 4,5%

территории области (рисунок 1). Проектируемая территория расположена в северо-западной части Прикаспийской низменности. По характеру рельефа она представляет почти полого-плоскую и слабоволнистую равнину со слабым наклоном к югу. Эта равнина представлена местами западинами, ссорами и древними руслами временных водотоков.

На территории природного резервата гидрографическая сеть развита весьма слабо. На востоке проектируемой территории протекает река Ащыозек с несколькими притоками, среди которых наиболее крупные – правобережные притоки Шерембетсай, Таткенсай, Жамансай, балка Астаусалган, река Бершарал; левобережные притоки – Колдыбайсай, Терексай, влевающие в крупное озеро Аралсор. В связи с частым чередованием условий почвообразования, почвы территории отличаются большой пестротой и мозаичностью, а также комплексностью. Однако в пределах отдельно взятых частей территории будущего природного резервата на водораздельных пространствах отмечается выраженное преобладание зональных типов почв – обыкновенных каштановых, светло-каштановых и бурых [7].

ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

Макроположение проектируемой территории характеризуется ее расположением в глубине южной части умеренного пояса материка Евразии, точнее, на крайнем юго-востоке одной из его частей света – Европы, примерно на расстоянии 2,5 тысяч км от Атлантического океана.

Мезоположение территории определяется ее расположением на крайнем севере-западе Казахстана в бассейне рек Малого Узенья и Ащыозек, на пространстве Волго-Уральского междуречий. Территория расположена в северной части Прикаспийской тектонической впадины, которую часто называют Северным Прикаспием.

Микроположение территории обуславливается тем, что он полностью расположен в Прикаспийской низменности, только с севера заходит небольшие участки Общего Сырта.

Проектируемая территория расположена на западе Западно-Казахстанской области в пределах территории Жанибекского, Бокейординского, Казталовского районов и состоит из трех участков. Граница территории на севере проходит по линии от аулов Жаксыбай – Акадыр до автодороги Жанибек – Таловка, далее аулов Борсы – Тегисшил и зимовок Корган – Кайролла, далее через аул Жигер – Аккол до аула Акоба. Потом граница проходит по юго-восточному направлению вдоль канала до аула Куйгенкол, далее через аула Курсай, зимовки Айдекен, Шарбаккыр, а южная и юго-восточная граница проходит по территории Бокейординского района через зимовки Кара Мак до северной части автодороги Чапаев – Сайхын. Далее по южной части озера Аралсор и по сора Батпак и восточная граница проходит по территории Казталовского района через аулов Саралжын – Нурсай, потом поворачивая северо-западном направлении на аула Караоба и Жаксыбай.



Рисунок 1. Карта проектируемого государственного природного резервата «Бокейорда» Западно-Казахстанской области

Данный участок проектируемой территории с севера на юг протягивается на 150–160 км, а с запада на восток 70–80 км. Приблизительные географические координаты крайних точек: северная 50°13' с.ш., южная 48°55' с.ш., западная 47°18' в.д., восточная 48°52' в.д.

РЕЛЬЕФ

Проектируемая территория расположена в северо-западной части Прикаспийской низменности. По характеру рельефа она представляет почти идеальную равнину с очень пологим наклоном к югу (рисунок 2).

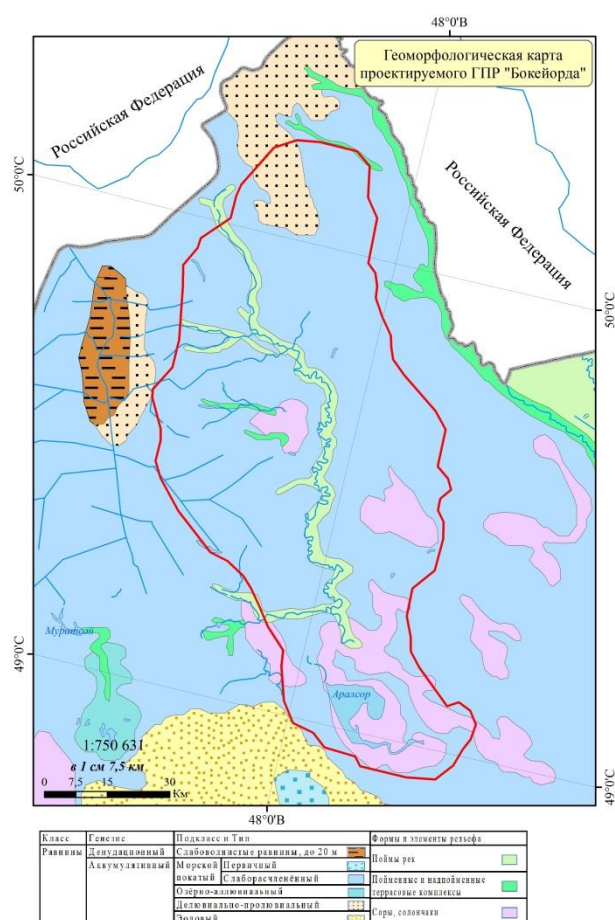


Рисунок 2. Геоморфологическая карта проектируемого государственного природного резервата «Бокейорда» Западно-Казахстанской области

Эта равнина представлена местами углублениями преимущественно микро и реже мезорельефного порядка. Геологическая молодость Прикаспийской равнины, сухость климата, очень слабый наклон и незначительная приподнятость ее над уровнем моря объясняют слабое расчленение ее поверхности.

По особенностям рельефа выделяется северный сыртовый район, где водоразделами отдельных блоков являются невысокие сглаженные увалы – сырты.

Плато всех сыртов ровное и редко слабоволнистые, склоны пологие. Ширина сыртов колеблется

от 7 до 13 км, длина – от 6 до 20 км. Южная часть проектируемой территории представляет собой абсолютную равнину с незначительными покатостями общего рельефа и хорошо выраженным рельефом в виде сусликовин, блюдцеобразных понижений и слабовыраженных плоскодонных потяжин.

В северной части проектируемой территории наблюдается некоторая приподнятость и эрозионная деятельность за счет вод весеннего стока. Здесь находятся несколько оврагов – Тарылгансай, Конырсай, Жанатасай, местами заполненные водой. Берега их крутые, обрывистые, до нескольких метров глубиной. Также на проектируемой территории, особенно в северной и восточной частях, имеются много лощин, блюдцеобразных понижений, палин, лиманов и соров. В западной части проектируемой территории расположены соры, заполненные водой оз. Соркуль и Захатсор, соединенные ручьем Тарылгансаем.

Понижения, именуемые лиманами, систематически заполняются водами стока и используются как сенокосы.

Распределение абсолютных и относительных отметок высот объясняют то, что геотектура осложнена площадными и линейными морфоструктурами первого и второго порядка, то есть значительными неровностями, в образовании которых приняли участие эндогенные процессы регионального охвата. Морфоструктуры возникли в разное время вследствие тектонических движений, происходящих в недрах впадины, а в их строении четко отражается сложение геологических структур.

В силу длительного морского режима геологического развития территории поверхность имеет выраженную выравненность (рисунки 3, 4). На севере небольшую территорию занимают южные отроги Общего Сырта, где в рельефе преобладают низко холмисто-волнистые поверхности. Абсолютная высота поверхности на севере 60 м, а самая низкая точка с абсолютной высотой 0 м на юго-востоке – при впадении р. Ащыозек (Горькая) в сор Жалпак. Почти вся территория расположена в пределах Прикаспийской низменности.

Территория, как и вся Западно-Казахстанская область, располагается на юго-востоке Восточно-Европейской равнины. Из-за сильной выравненности и молодости для территории характерны лишь водно-эрозионные и просадочные формы (степные западины, или блюдца) скульптурного рельефа, а также лиманы структурного происхождения. Среди морфологических структур слабо заметны элементы солянокупольных поднятий, значительно сильнее, особенно на юге территории, выражены связанные с ними отрицательные формы. Среднее расстояние между понижениями показывает слабое горизонтальное расчленение поверхности Прикаспийской низменности. Наибольшие показатели (менее 2 км) связаны с наиболее высокими участками области –

на северо-востоке и на севере. Для них характерно среднее значение горизонтального расчленения от 5 до 2 км.

Показатели горизонтального расчленения, характеризующиеся изолинией в 5 км, четко отделяют Прикаспийскую низменность от окружающих возвышений. Среднее значение для неё равно 25 км. Более расчленены бассейны рек Малого Узенья окрестности котловины Аралсор, где оно, в связи с эрозийной деятельностью временных водотоков, составляет от 2 до 5 км, а в районах развития соляных куполов – от 0,1 до 2 км.

На территории проектируемого резервата расположена Горьковско-Соровая тектоническая синклинальная депрессия. По А.Г. Доскачу она характери-

зуется чередованием глубоких соровых впадин и разной высоты (3–10 м) пологих повышений, образованных галокинезом [8]. Соровые понижения имеют разнообразную величину и очертания, от округлых до лопастных. С деятельностью древней р.Ащыозек (Горькая) связано распространение руслообразных соров, имеющих флювиальное происхождение. Наиболее крупным соровым понижением является озеро Аралсор с плоским дном и высоким обрывистым берегом. Его обрыв пререзают небольшие ручьи с солёной водой.

Соры занимают, как правило, компенсационные мульды и мульды оседания, представляя собой наиболее глубокие (до 6–10 м) замкнутые бессточные понижения.



Рисунок 3. Равнинный рельеф



Рисунок 4. Микрохолмистый равнинный рельеф

Они обычно заняты солеными очень мелководными озерами, которые почти полностью пересыхают летом, оставляя на поверхности корки солей. Полузаселенные мульды занимают замкнутые и приречные лиманы, последние особенно широко развиты вдоль реки Малый Узень. Они представляют собой глубокие (до 4 м) разнообразных размеров и формы понижения. Понижения этого типа широко развиты и в дельтовых разливах бессточных рек. Поэтому большинство лиманов приурочено к древним береговым линиям, где соровые и лиманные понижения обычно имеют береговое (морское) происхождение, то есть это выполненные небольшие брошенные заливы очень пологих берегов древнего Каспия.

Из водно-эрозионных форм рельефа в пределах территории проектируемого природного резервата находится на правом берегу среднем и нижнем течении реки Ащыюзек. На всех реках преобладают крутые и отвесные берега. В общем горизонтальная и вертикальная расчлененность района реками сравнительно незначительная.

Балочная сеть редкая, слабо разработанная. Глубокие и протяженные балки обычно служат притоками рек. Крупные по площади, но относительно мелкие по глубине, многочисленные понижения тектонического характера в районе повсеместно используются в качестве лиманов. Часто встречаются лиманы замкнутые и приречные, это неглубокие понижения вдоль степных рек. Приречные лиманы заливаются водой из степных рек во время весеннего половодья.

Более мелкие по глубине и площади поверхности получили название падьины. Водораздельные плоские пространства имеют общей незначительный уклон в сторону Каспийского моря – озера, поэтому называются межпадинами.

Поверхность межпадинных пространств осложнена формами микрорельефа: положительными – сусликовинами, образовавшимися путем выбросов материала из нор на колониях малого суслика (зоогенный микрорельеф); отрицательными – микропонижениями (степными западинами, степными блюдцами), возникшими путем оседания глинистых пород; микросклонами, расположенными между микроповышениями и микропонижениями.

Среди форм микрорельефа, благодаря пышной степной растительности и зарослями кустарников, особенно выделяются микропонижения – различных размеров, округлые, неглубокие, плоскодонные западины. Глубина обычно колеблется от 8 до 20–25 см, изредка достигая 40 см. Часто они бывают соединены между собой перемычками и образуют длинные цепочки, ориентированные в сторону об-

щего малозаметного уклона местности. Непрерывная цепь микропонижений иногда прослеживается на протяжении нескольких километров. Микропонижения полностью перехватывают, весенние снеговые воды и переводят, их в грунтовые, поэтому формы линейной водной эрозии на поверхности межпадинных пространств отмечаются крайне редко. Северная часть Прикаспийской низменности является классическим примером распространения суффозионного микрорельефа.

Сусликовины обычно имеют высоту до 40–45 см, диаметр холмиков 1–4 м, изредка до 5 м и более. С севера на юг низменности отмечено уменьшение их количества, размеров и глубин, а также изменение их биомов в сторону нарастания признаков аридности. Более чем за сто лет изучения степных блюдцев возникло множество представлений об их происхождении. Общим для большинства взглядов является признание роли процесса вымывания растворимых солей и мелких механических частиц грунтов вглубь (суффозии). Отличия теорий происхождения западин заключаются в объяснении причин, дающих толчок локальным процессам изменений солонцов.

К востоку от грязей Хаков и к югу от озера Аралсора территория занята преимущественно грядовобугристыми песками с золовыми формами рельефа. Пески перемежаются с плоскими равнинами, слегка вогнутыми понижениями, ашиками. Общий равнинный характер ашиков на протяжении их ширины, достигающей местами 10 км, и длины, простирающейся на несколько десятков километров, незначительные неровности в рельефе не нарушают. Поверхность ашиков заметно понижается в направлении к грязям Хакам, и с краев к центру, где располагаются обычно замкнутые соры.

В местах сбой растительности скотом (у населенных пунктов, зимовок, водопоев) наблюдается барханные пески.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая, что в Западно-Казахстанской области в настоящее время отсутствуют особо охраняемые природные территории со строгим режимом охраны, организация нового природоохранного учреждения позволит в полной мере не только обеспечить сохранение и восстановление степного биоразнообразия региона, но и улучшить социально-экономические условия, и будет способствовать развитию экологического туризма. В значительной степени это будет связано с созданием крупного государственного природного резервата «Бокейорда» и комплексного государственного природного заказника на западе Западно-Казахстанской области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петренко А.З., Джубанов А.А., Фартушина М.М., Иркалиева Р.М., Рамазанов С.К., Сдыков М.Н., Дарбаева Т.Е., Кольченко О.Т., Чернышев Д.М. Природно-ресурсный потенциал и проектируемые объекты заповедного фонда Западно-Казакстанской области. Уральск: ЗКТУ, 1998. – 86 с.
2. Отчет по теме: «Ретроспективный анализ причин заболевания и падежа сайгаков в 2010–2011 гг. в Западном Казахстане. – Астана, 2011
3. Алехин В.В. Методика полевого изучения растительности и флоры. – М., 1983. – 203 с.
4. Методические указания по ведению Летописи природы в особо охраняемых природных территориях со статусом юридического лица. Утвержденный Комитетом лесного и охотничьего хозяйства Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан от 18 апреля 2007 года №156.
5. Salikhov T.K., Karagoishin Zh.M., Svanbayeva Z.S., Inkárova Zh.I., Dukenbayeva A.D., Sagatbaiev E.N., Rakisheva A.K. Geocological assessment of the projected State Nature Reserve ‘Bokeyorda’ in West Kazakhstan Region. /Oxidation Communications. – 2016, № 39 (4). – С. 3579–35907.
6. Салихов Т.К. Мониторинговые исследования почвенного покрова на территории проектируемого государственного природного резервата «Бокейорда» Западно-Казакстанской области /Вестник Национального ядерного центра Республики Казахстана. – 2017. – № 1. – С. 113–119
7. Андрущенко О.Н. Естественно-исторические районы Прикаспийской низменности (Междуречье Волга-Урал) // Труды географического факультета Белорусского университета. Минск, 1958. – С. 137–219.
8. Доскач А.Г. Материалы геоморфологической карте Южного Заволжья и Прикаспийской низменности. – М., 1954. – С. 47–877.

БАТЫС ҚАЗАҚСТАН ОБЛЫСЫНДА ЖОБАЛАНҒАН «БӨКЕЙОРДА» МЕМЛЕКЕТТІК ТАБИҒИ РЕЗЕРВАТ ТЕРРИТОРИЯСЫНЫҢ ГЕОГРАФИЯЛЫҚ ОРНАЛАСУЫ ЖӘНЕ ЖЕР БЕДЕРІ

Салихов Т.Қ., Салихов Т.С., Берденов Ж.Г.

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Бұл ғылыми зерттеулер Қазақстан Республикасының Үкіметімен Біріккен Ұлттар Ұйымының Даму бағдарламасының Ғаламдық экологиялық қор аясында, дала экожүйелерін арттыруға бағытталған «Далалық экожүйелерді сақтау мен тұрақты басқару» жүзеге асырылды. Батыс Қазақстан облысында жобаланған «Бөкейорда» мемлекеттік табиғи резерват геоэкожүйелеріндегі оның географиялық орналасуы мен жер бедерінің қазіргі кездегі жағдайын талдаумен зерттеу нәтижелері. Экожүйелік талдау мен ГАЖ-технологиялар негізінде резерватың шекарасы анықталып, функционалдық аймақтарға бөлу бағыттарын жүзеге асырылады, резерваттың географиялық орналасуы мен жер бедерінің қазіргі жағдайы талданып, карталары жасалынды. *Түйін сөздер:* мемлекеттік табиғи резерваты, макроорналасуы, мезоорналасуы, микроорналасуы, микрорельеф (жер бедері), мезорельеф және морфокұрылымы.

GEOGRAPHICAL POSITION AND RELIEF OF THE TERRITORY OF THE PROJECTED STATE NATURE RESERVE “BOKEYORDA” WEST KAZAKHSTAN REGION

T.K. Salikhov, T.S. Salikhova, Zh.G. Berdenov

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

The studies were carried out within the framework of the project of the Government of the Republic of Kazakhstan and the Global Environment Facility of the United Nations Development Program (UNDP) “Conservation and Sustainable Management of Steppe Ecosystems”, aimed at increasing steppe ecosystems. As a result of research of geoecosystems of the projected state natural reserve “Bokeyorda” of the West Kazakhstan region, the geographic situation and terrain are analyzed. Based on the ecosystem analysis and GIS technology, the boundaries of the reserve have been determined, zoning of functional areas has been carried out, and the current state of the geographic location and terrain has been analyzed, and maps of the study area have been compiled.

Key words: state natural reserve, macrolocation, mesodexistence, microposition, microrelief, mesorelief and morpho-structure of the territory.

УДК 910.3:631.4 (574)

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПЛОДОРОДИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ГЕОЭКОСИСТЕМ ПРИГОРОДА АСТАНЫ

Салихов Т.К.

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

В результате исследований определены морфологические признаки и показатели плодородия почвенного покрова геоэкосистем: объем и плотность твердой фазы, объемная масса, влажность почвы, механический и микроагрегатный состав, наименьшая и полная влагоемкость, влажность устойчивого завядания растений, продуктивная влага, запасы воды и почвенного воздуха, строение пахотного слоя и структурный состав почв, содержание гумуса, доступные элементы почвы, запасы элементов питания, поглощенные основания, содержание ионов в водной вытяжке.

Ключевые слова: геоэкосистема, темно-каштановая почва, плодородие и свойства почвы, плотность, влажность и механический состав почвы, содержание гумуса и запасы элементов питания, содержание поглощенных оснований и ионов в водной вытяжке.

ВВЕДЕНИЕ

Земельный кодекс Республики Казахстан [1], обязывает проводить мониторинг земель и научный учет почв в соответствии с государственным земельным кадастром. Задачи государственного контроля состоят в обеспечении правил ведения земельного кадастра и землеустройства; выполнения мероприятий по сохранению и воспроизводству плодородия почв, рациональному использованию и охране земель.

Повышение эффективности использования земель сельскохозяйственного назначения на путем сохранения и повышения плодородия почв является одной из приоритетных задач земледелия, решение которой имеет ключевое значение в обеспечении устойчивого развития аграрного сектора экономики и продовольственной безопасности страны.

Сохранение и повышение плодородия почв является основной частью общей проблемы рационального использования земельных ресурсов, увеличение продуктивности и улучшение почвенной экологии агроландшафтов.

По данным кафедры экологии, растениеводства и земледелия [2], на фоне длительного использования соломы в качестве органического удобрения в зернопаровых севооборотах, с включением озимых и зернобобовых культур, обеспечивается простое воспроизводство почвенного плодородия, а при внесении навоза и возделывании сидеральных культур – его расширенное воспроизводство.

В настоящее время в земледелии стало проблематично внесение на поле навоза и возделывание сидеральных культур. Поэтому расширение посевов многолетних трав на выводящих полях полевых севооборотов позволяет существенно снизить потери гумуса, что при достаточной площади трав стабилизирует плодородие почвы.

В сравнительном опыте, проведенном на Уральской сельскохозяйственной опытной станции [3], содержание гумуса на старопахотных землях состави-

ло в слое 0–20 см – 2,5 %, в слое 20–40 см – 2,16 %, в пятипольном севообороте после второй ротации содержание гумуса составило 2,82 и 2,76 %, а на выводящем поле с житняком (12 лет) гумус в почве имел 3,07 и 2,78 % соответственно.

Как известно, в процессе интенсивного воздействия человека на почву ухудшаются ее водно-физические свойства, уменьшается содержание важнейшей составной части почвы – гумуса. С количеством и качеством гумуса тесно связаны основные морфологические признаки почв, водный, воздушный и тепловой режимы, важнейшие физические и физико-химические свойства, содержание и формы соединений в почвах основных элементов питания растений, биохимические и микробиологические показатели [4, 5].

Поэтому, изучение природных факторов почвообразования и производственной деятельности хозяйства; физических, биологических и физических физических химических показателей плодородия почв, коррелирующих с урожайностью культур позволяют на количественном уровне оценивать контрастность, сложность и неоднородность почвенного покрова конкретного массива. Это в свою очередь позволяет объективно решать вопрос о пригодности использования почв в хозяйственных целях и определить кадастровую стоимость земельного участка.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель наших исследований – изучение современного состояния физических, биологических и химических свойств почвенного покрова пригорода Астаны.

В связи с этим в исследованиях в пригороде Астаны в 5 км на северо-востоке поселка Учхоз на пологонаклонной приишимской равнины были изучены биологические, химические и физические свойства почвенного покрова, а также их морфологические признаки почв: объем и плотность твердой фазы, строение пахотного слоя, механический, микроагрегатный и структурный состав почв, наименьшая и

полная влагоемкость, влажность устойчивого завядания растений, продуктивная влага, запасы воды и воздуха, содержание гумуса, доступных элементов, запасов элементов питания, поглощенные основания и содержание ионов в водной вытяжке по общепринятым методикам [6–10, 13].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения генетического наименования почв и отбора почвенных образцов закладывали почвенные разрезы. В полевых условиях морфологические признаки позволяют установить вид и разновидность темно-каштанового подтипа почвы, которая по мощности гумусового слоя $A+B_1$ характеризуется как мощная, а по механическому составу $A_{пах}$ – как среднесуглинистая.

Характеристика основного разреза темно-каштановой почвы:

$A_{пах}$ $\frac{0-28}{28}$	Темно-каштановый, комковато-зернистый, рыхлый, тонкотрещиноватый, влажный, пронизан корнями, среднесуглинистый, переход ясный.
B_1 $\frac{28-51}{23}$	Серо-бурый, крупнокомковатый, плотный, тонкопористый, сырой, среднесуглинистый, переход постепенный.
B_2 $\frac{51-70}{19}$	Пестрый серовато-бурый, комковато-призматический, влажный, плотный, тяжело-суглинистый, языковатый с затеками гумуса, вскипание от HCl в нижней части.
B_k $\frac{70-100}{30}$	Пятнистый буровато-желтый, призматично-ореховатый, слабовлажный, плотный, карбонаты в форме белоглазки, тяжело-суглинистый, переход постепенный.
C $\frac{100-150}{50}$	Желтый, мелкопризматический, слабовлажный, плотный с журавчиками извести и кристалликами гипса, тяжело-суглинистый.

В лабораторных условиях, были проведены методом пипетки механический и микроагрегатный анализы почвенных образцов [11], определили количественное содержание различных фракций, на основании которых уточнялось полевое название разновидности $A_{пах}$ и разряд материнской породы (таблица 1).

По данным таблицы 1, темно-каштановая почва относится к среднесуглинистой, илевато-пылевой разновидности, так как содержание физической глины в пахотном горизонте составляет 43,6 %, причем большая часть 22,6 % приходится на долю ила, а в составе физического песка преобладают фракции крупной пыли. В горизонте C количество физической глины достигает 51,4 % и материнская порода

характеризуется как тяжелосуглинистая пылевато-иловатая.

Микроагрегатный состав свидетельствует, что фракции ила, мелкой и средней пыли склеены в микроагрегаты размером 0,25-0,01 мм, а фактор дисперсности, рассчитанный по данным механического и микроагрегатного состава, указывает на относительно хорошее структурное состояние почвы и водопрочность ее агрегатов, что в конечном итоге отражают и другие физические показатели плодородия темно-каштановой почвы (таблица 2).

Физические показатели плодородия темно-каштановой почвы позволяют рассчитать запасы воды и воздуха, соотношения при различных водно-физических константах, а также запасы продуктивной влаги и нормы полива для сельскохозяйственных культур (таблица 3).

Общие запасы воды при наименьшей влагоемкости ($27,8 \% = НВ$) пахотного слоя ($h = 28$ см), где плотность почвы $ОМ = 1,15$ г/см³ составляют 895 м³/га.

Следовательно, физические показатели плодородия почвенного покрова геоэкосистем пригорода Астаны с учетом агрометеорологических условий позволяют рационально управлять водно-воздушным режимом орошаемых и неорошаемых земель в различные годы.

Основным биологическим показателем плодородия почв является процентное содержание гумуса, определение которого в слое 0–50 см является главным диагностическим признаком при бонитировке почв РК.

Для объективной оценки различных почв необходимо процентное содержание гумуса пересчитать в его запасы в т/га для каждого генетического горизонта (таблица 4).

Одним из основных неблагоприятных свойств почв, снижающих их плодородие в условиях РК, является солонцеватость и засоленность профиля.

Причинами засоления и солонцеватости почв являются почвообразующие (материнские) породы и минерализованные грунтовые воды, непригодные для полива оросительные воды и низкая естественная дренируемость территории.

Исследованиями [12] установлено, что при правильном выборе объекта орошения, соблюдения основ эксплуатации оросительных систем, орошение не вызвало существенных изменений в вещественном составе почв. Так, содержание солей, гумуса, обменных катионов после 16 лет орошения осталось на уровне их неорошаемых аналогов, но отмечено некоторое увеличение подвижности карбонатов.

Химические свойства почв, представленные доступными элементами питания растений и выраженные в мг/100 г, следует также пересчитать в запасы азота, фосфора и калия в кг/га (таблица 5 и 6).

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПЛОДОРОДИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА
ГЕОЭКОСИСТЕМ ПРИГОРОДА АСТАНЫ**

*Таблица 1. Механический (числитель) и микроагрегатный (знаменатель) состав темно-каштановой почвы
геоэкосистем пригорода Астаны*

Мощность горизонта	Влажность среднего образца, %	Потери при обработке НСІ, %	Содержание фракции, %; размер частиц, мм								Фактор дисперсности
			1,0-0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	менее 0,001	менее 0,01	более 0,01	
A _{пах} <u>0-28</u> 28	<u>5,1</u> 5,1	<u>1,4</u> —	<u>0,4</u> 15,6	<u>16,8</u> 33,1	<u>39,2</u> 39,9	<u>7,5</u> 5,7	<u>13,5</u> 3,4	<u>22,6</u> 2,3	<u>43,6</u> 11,4	<u>56,4</u> 88,6	10,2
B ₁ <u>28-51</u> 23	<u>5,2</u> 5,2	<u>2,1</u> —	<u>0,9</u> 10,0	<u>19,1</u> 33,1	<u>37,1</u> 44,4	<u>6,6</u> 5,8	<u>12,2</u> 3,5	<u>24,1</u> 3,2	<u>42,9</u> 12,5	<u>57,1</u> 87,5	13,3
B ₂ <u>51-70</u> 19	<u>4,9</u> 4,9	<u>2,5</u> —	<u>1,2</u> 4,5	<u>19,8</u> 40,4	<u>31,5</u> 40,1	<u>8,0</u> 9,0	<u>12,1</u> 2,2	<u>27,4</u> 3,8	<u>47,5</u> 15,0	<u>52,5</u> 85,0	13,9
B _к <u>70-100</u> 30	<u>4,5</u> 4,5	<u>3,6</u> —	<u>1,5</u> 16,5	<u>19,9</u> 34,0	<u>28,8</u> 35,6	<u>8,3</u> 7,0	<u>12,0</u> 2,5	<u>29,5</u> 4,4	<u>49,8</u> 13,9	<u>50,2</u> 86,1	14,9
C <u>100-150</u> 50	<u>4,3</u> 4,3	<u>6,3</u> —	<u>1,1</u> 15,3	<u>17,6</u> 36,5	<u>29,9</u> 33,4	<u>9,4</u> 5,2	<u>11,6</u> 5,0	<u>30,4</u> 4,6	<u>51,4</u> 14,8	<u>48,6</u> 85,2	15,1

Таблица 2. Физические показатели плодородия темно-каштановой почвы геоэкосистем пригорода Астаны

Горизонты почв	Плотность, г/см³		ВУЗ	НВ	V _{тв}	ОС	КС	НС	Соотношение КС и НС
	почвы, ОМ	твердой фазы, ρ	% от массы почвы		% от объема почвы				
A _{пах}	1,15	2,56	11,6	27,8	44,9	55,1	32,0	23,1	1,39
B ₁	1,34	2,61	11,1	20,9	51,3	48,7	28,0	20,7	1,35
B ₂	1,38	2,65	10,4	19,6	52,1	47,9	27,0	20,9	1,29
B _к	1,46	2,68	9,8	18,0	54,5	45,5	26,3	19,2	1,37
C	1,45	2,70	10,1	18,1	53,7	46,3	26,2	20,1	1,30
A+B+C	1,37	2,65	10,5	20,2	51,7	48,3	27,7	20,6	1,35

Таблица 3. Соотношение воды и воздуха при различных гидрологических константах темно-каштановой почвы пригорода Астаны

Горизонт, см	Запас воды, м³/га					Запас воздуха, м³/га			Соотношение воды и воздуха		Норма полива, м³/га
	ВУЗ	ВЗР	НВ	ПВ	ДАВ	ВУЗ	ВЗР	НВ	ВЗР	НВ	
A _{пах} <u>0-28</u> 28	374	634	895	1542	521	1168	908	647	0,70	1,38	261
B ₁ <u>28-51</u> 23	342	493	644	1119	302	777	626	475	0,79	1,36	151
B ₂ <u>51-70</u> 19	273	393	514	910	241	637	517	396	0,76	1,30	121
B _к <u>70-100</u> 30	429	608	788	1366	359	937	758	578	0,80	1,36	180
C <u>100-150</u> 50	732	1022	1312	2313	580	1581	1291	1001	0,79	1,31	290
A+B+C 0-150	2150	3150	4153	7250	2003	5100	4100	3097	0,77	1,34	1003

Таблица 4. Биологические и химические показатели плодородия темно-каштановой почвы пригорода Астаны

Мощность горизонта, см	Гумус		Доступные элементы, мг/100 г твердой фазы почвы			Запасы элементов питания, кг/га		
	%	т/га	N	P	K	N	P	K
A _{пах} <u>0-28</u> 28	4,6	148,1	5,8	1,4	86,0	186,8	45,1	2769,2
B ₁ <u>28-51</u> 23	3,4	104,8	3,7	0,9	55,0	114,0	27,7	1695,1
B ₂ <u>51-70</u> 19	1,9	49,8	2,1	0,4	31,0	55,1	10,5	812,8
B _к <u>70-100</u> 30	0,8	35,0	0,7	следы	13,0	30,7	—	569,4
C <u>100-150</u> 50	0,2	14,5	0,1	—	3,0	7,3	—	217,5
A+B+C 0-150	2,3	352,2	2,6	0,6	38,4	393,8	83,3	6064,0

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПЛОДОРОДИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА
ГЕОЭКОСИСТЕМ ПРИГОРОДА АСТАНЫ**

Таблица 5. Поглощенные основания в мг-экв./100 г (числитель) и процентах от емкости поглощения (знаменатель) темно-каштановой почвы

Мощность горизонта, см	Ca	Mg	Na	K	Сумма
A _{пах} 0–28 28	<u>22,2</u> 65,3	<u>10,1</u> 29,7	<u>0,7</u> 2,1	<u>1,0</u> 2,9	<u>34,0</u> 100
B ₁ 28–51 23	<u>20,0</u> 63,9	<u>9,4</u> 30,0	<u>0,9</u> 2,9	<u>1,0</u> 3,2	<u>31,3</u> 100
B ₂ 51–70 19	<u>20,1</u> 68,4	<u>7,8</u> 26,5	<u>0,6</u> 2,0	<u>0,9</u> 3,1	<u>29,4</u> 100
B _к 70–100 30	<u>20,1</u> 73,1	<u>5,5</u> 20,0	<u>0,8</u> 2,9	<u>1,1</u> 4,0	<u>27,5</u> 100
C 100–150 50	<u>16,8</u> 73,0	<u>5,4</u> 23,5	<u>0,4</u> 1,7	<u>0,4</u> 1,7	<u>23,0</u> 100

Таблица 6. Содержание ионов в водной вытяжке в мг-экв./100 г (числитель) и процентах от массы темно-каштановой почвы (знаменатель)

Мощность горизонта, см	Сухой остаток	Анионы			Катионы			HCO ₃ Cl+ SO ₄	SO ₄ Cl
		HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	Na		
A _{пах} 0–28 28	<u>1,74</u> 0,060	<u>0,25</u> 0,015	<u>0,03</u> 0,001	<u>0,59</u> 0,028	<u>0,52</u> 0,011	<u>0,26</u> 0,003	<u>0,09</u> 0,002	0,4	20,0 сульф.
B ₁ 28–51 23	<u>1,96</u> 0,068	<u>0,28</u> 0,017	<u>0,06</u> 0,002	<u>0,64</u> 0,031	<u>0,55</u> 0,011	<u>0,24</u> 0,003	<u>0,19</u> 0,004	0,4	10,6
B ₂ 51–70 19	<u>2,30</u> 0,084	<u>0,49</u> 0,030	<u>0,06</u> 0,002	<u>0,60</u> 0,029	<u>0,67</u> 0,014	<u>0,22</u> 0,003	<u>0,26</u> 0,006	0,7	10,0
B _к 70–100 30	<u>2,16</u> 0,079	<u>0,54</u> 0,033	<u>0,04</u> 0,001	<u>0,50</u> 0,024	<u>0,76</u> 0,016	<u>0,19</u> 0,002	<u>0,13</u> 0,003	1,0	12,5
C 100–150 50	<u>2,00</u> 0,073	<u>0,51</u> 0,031	<u>0,03</u> 0,001	<u>0,46</u> 0,022	<u>0,64</u> 0,013	<u>0,22</u> 0,003	<u>0,14</u> 0,003	1,0	15,3

На настоящее время в качестве объективного показателя солонцеватости следует брать содержание поглощенных натрия и магния в ППК, выраженное в процентах от суммы поглощенных оснований (таблица 5), результаты которой свидетельствуют, что темно-каштановые почвы относятся к несолонцеватому виду, так как содержание поглощенного натрия в них меньше 3 %.

Определение количества ионов водной вытяжки (таблица 6) позволяет по соотношению анионов и катионов в мг-экв./100 г рассчитать химизм засоления в слоях 0–50 см и 50–100 см, а затем установить степень засоления по процентному содержанию солей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные данные показывают, что подтип темно-каштановой почвы по химизму засоления соответствует сульфатному роду, а по содержанию легкорастворимых солей вид, характеризуется как незасоленный, а поэтому их можно использовать для освоения орошаемых и неорошаемых севооборотов.

На основании изученных данных, показатели плодородия почвенного покрова геоэкосистем пригорода Астаны с учетом агрометеорологических условий позволяют рационально управлять водным, воздушным и пищевым режимом орошаемых и неорошаемых земель в различные годы, что можно регулировать увеличение урожайности сельскохозяйственных культур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Земельный кодекс Республики Казахстан: офиц. текст: по состоянию на 4 мая 2005 г. – Алматы: Юрист. – 2005. – 116 с.
2. Вьюрков В.В. Сохранение и повышение плодородия темно-каштановых почв Приуралья. //Сб. докладов междунар. науч.-практ. конф. Оренбургского регионального института переподготовки и повышения квалификации руководящих кадров и специалистов АПК «Земельные отношения на современном этапе: проблемы, пути решения». – Оренбург. – 2004. – С. 185–191.
3. Браун Э.Э., Чекалин С.Г., Лиманская В.Б., Жакселикова Г.К. Выводное поле многолетних трав, как основной фактор повышения плодородия земель. //Сб. докладов междунар. науч.-практ. конф. «Экономическое, социальное и культурное развитие Западного Казахстана: история и современность», посвящ. 180-летию Оружейной палаты Букеевского ханства. – Уральск: ЗКАТУ им. Жангир хана. – 2008. – С. 287–288.

4. Кененбаев С.Б., Иорганский А.И. Основные итоги НИР по проблеме воспроизводства плодородия неполивных темно-каштановых почв Казахстана. //Сб. докладов междунар. научн.-практ. конф. «Перспективные направления стабилизации и развития агропромышленного комплекса Казахстана в современных условиях», посвящ. 90-летию со дня образования Уральской с.-х. станции и 100-летию со дня рождения Н.И. Башмакова. – Уральск. – 2004. – С. 184–187.
5. Сапаров А.С., Рамазанова Р.Х. Пути повышения продуктивности сельскохозяйственных культур и плодородия почв в условиях рынка. //Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. – 2002. – №8. – С. 27–29.
6. Архипкин В.Г., Вьюрков В.В. Агрофизические показатели плодородия почв Западного Казахстана: метод. указание по земледелию. – Уральск: Зап.-Каз. СХИ. – 1989. – 52 с.
7. Сулейменова Н.Ш., Әуезов Ә.Ә., Оразымбетова Қ.Н. Егіншілік практикумы. – Алматы. – 2006. – 227 бет.
8. Салихов Т.К. Практикум по почвоведению. – Астана: ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. – 2009. – 172 с.
9. Бекназаров Ж.Б., Архипкин В.Г., Салихов Т.К. Методические рекомендации для выполнения курсовой работы по почвоведению на тему: «Оценка плодородия почв земельных угодий». - Уральск: ЗКАТУ им. Жангир хана. – 2007. – 35 с.
10. Елешев Р.Е., Елемесов Ж.Е., Мухаметкәрімов Қ.М. Топырақтану практикумы. – Алматы: Қазақ ұлттық аграр. ун-ті. – 2006. – 156 бет.
11. Рахимғалиева С.Ж. Практикум по почвоведению: учеб. пособие для с.-х. вузов. – Уральск: ЗКАТУ им. Жангир хана. – 2004. – 198 с.
12. Фартушина М.М., Дарбаева Т.Е. К вопросу изменения физических, физико-химических и химических свойств почв при орошении. //Сб. докладов междунар. научн.-практ. конф. «Перспективные направления стабилизации и развития агропромышленного комплекса Казахстана в современных условиях», посвящ. 90-летию со дня образования Уральской с.-х. станции и 100-летию со дня рождения Н.И. Башмакова. – Уральск. – 2004. – С. 89–92.
13. Салихов Т.К. Батыс Қазақстан агроэкожүйелеріндегі топырақ жамылғысының құнарлылығының қазіргі жағдайы. // С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университетінің Ғылым жаршысы. – 2010. – № 4. – 96–101 бет.

АСТАНА ҚАЛАСЫНЫҢ МАҢЫНДАҒЫ ГЕОЭКОЖҮЙЕЛЕРІНДЕГІ ТОПЫРАҚ ЖАМЫЛҒЫСЫНЫҢ ҚҰНАРЛЫЛЫҒЫНЫҢ ҚАЗІРГІ КЕЗДЕГІ ЖАҒДАЙЫ

Салихов Т.Қ.

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Зерттеу нәтижесінде геоэкожүйелерде топырақ жамылғысының морфологиялық белгілері және оның құнарлылығының көрсеткіштері анықталды: қатты фазасының көлемі мен тығыздығы, топырақтың көлемдік салмағы, топырақтың ылғалдылығы, механикалық және микроагрегаттық құрамы, төменгі және толық су сыйымдылығы, өсімдіктердің тұрақты сол ылғалдылығы, тиімді ылғалдылығы, топырақтағы су және ауа қоры, өңделетін қабатының құрылысы және топырақтың құрылымдық құрамы, қарашірік мөлшері, топырақтағы тиімді элементтері, оның қорек қоры, жұту сыйымдылығы, су сүзіндісіндегі сіңірілген иондардың мөлшері.

Түйін сөздер: геоэкожүйе, күнгірт қара қоңыр топырақ, топырақтың құнарлылығымен қасиеттері, топырақтың тығыздығы, ылғалдығы және механикалық құрамы, топырақтың қарашірік мөлшерімен қорек қоры, жұту сыйымдылығы және су сүзіндісіндегі сіңірілген иондар мөлшері.

THE CURRENT STATE OF SOIL FERTILITY GEOECOSYSTEMS SUBURB OF ASTANA

T.K. Salikhov

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

As a result of researches the morphological characteristics and soil fertility indicators geosystems: the volume and density of solids, bulk density, soil moisture, mechanical and microaggregational composition, the smallest and the total moisture content, moisture stable wilting plant available moisture, water supplies and soil air, structure arable layer and the structural composition of soil, humus content of soil available elements, battery reserves absorbed by the base, the content of ions in the aqueous extract.

Key words: geoecosystem, dark-kastanozems soil, fertility and soil properties, density, moisture content and texture of the soil, humus content and reserves of nutrients, the content of absorbed bases and ions in the aqueous extract.

СПИСОК АВТОРОВ

Алдабергенова Т.М., 17
Алейников Ю.В., 71
Байгожина А.А., 45, 51, 59
Бекмагамбетова Б.Е., 51
Берденов Ж.Г., 103
Виелеба В., 37
Витюк В.А., 24
Витюк Г.А., 24, 59
Вурим А.Д., 24, 51, 59
Елистратов С.Л., 94, 98
Ермоленко М.В., 98
Есильканов Г.М., 84
Жагипарова Л.К., 45, 51, 55, 59
Жанболатов О.М., 24
Иркимбеков Р.А., 45, 51, 59
Каражигитов Д.Б., 65

Карпиков А.Н., 17
Киевицкая А.И., 5
Кислицин С.Б., 17
Козырева М.С., 17
Койгельдинова М.Т., 84
Коровиков А.Г., 65
Котов В.М., 24, 51, 55, 59
Лукашенко С.Н., 84
Максимкин О.П., 11
Медетбеков Б.С., 71
Мурзагалиева А.А., 51, 59
Мухамедияров Н.Ж., 84
Надырова А.Р., 94
Нұрғали Е.Е., 11
Пахниц А.В., 51, 59
Попов Ю.А., 71

Райханов М.Б., 76
Рубан С.В., 11
Сагдолдина Ж.Б., 37
Салихов Т.К., 103, 109
Салихова Т.С., 103
Саматов Е.Б., 98
Сарсембаев Е.А., 76
Скаков М.К., 37
Степанова О.А., 94
Тарасенко Е.В., 76
Темиржанова А.Е., 84
Тоимбаев А.Б., 98
Уралов М.К., 17
Шакенов Е.З., 84

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи предоставляются в электронном виде (на CD, DVD диске или по электронной почте присоединенным [attachment] файлом) в формате MS WORD и печатной копии.

Текст печатается на листах формата А4 (210×297 мм) с полями: сверху 30 мм; снизу 30 мм; слева 20 мм; справа 20 мм, на принтере с высоким разрешением (300-600 dpi). Горизонтальное расположение листов не допускается.

Используются шрифт Times New Roman высотой 10 пунктов для обычного текста и 12 пунктов для заголовков. Пожалуйста, для заголовков используйте стили (Заголовок 1, 2...) и не используйте их для обычного текста, таблиц и подписуемых подписей.

Текст печатается через одинарный межстрочный интервал, между абзацами – один пустой абзац или интервал перед абзацем 12 пунктов.

В левом верхнем углу должен быть указан индекс УДК. Название статьи печатается ниже заглавными буквами. Через 3 интервала после названия, печатаются фамилии, имена, отчества авторов и полное наименование, город и страна местонахождения организации, которую они представляют. После этого, отступив 2 пустых абзаца или с интервалом перед абзацем 24 пункта, печатается аннотация к статье на русском языке, ключевые слова и основной текст. В конце статьи, после списка литературы, повторяются блоки «название, авторы, организации, аннотация, ключевые слова» на казахском и английском языке.

Максимально допустимый объем статьи – 10 страниц.

При написании статей необходимо придерживаться следующих требований:

- Статья должна содержать аннотации на казахском, английском и русском языках (130-150 слов) с указанием ключевых слов, названия статьи, фамилии, имени, отчества авторов и полного названия организации, города и страны местонахождения, которую они представляют;
- Ссылки на литературные источники даются в тексте статьи цифрами в квадратных [1] скобках по мере упоминания. Список литературы следует привести по ГОСТ 7.1-2003;
- Иллюстрации (графики, схемы, диаграммы) должны быть выполнены на компьютере (ширина рисунка 8 или 14 см), либо в виде четких чертежей, выполненных тушью на белом листе формата А4. Особое внимание обратите на надписи на рисунке – они должны быть различимы при уменьшении до указанных выше размеров. На обороте рисунка проставляется его номер. В рукописном варианте на полях указывается место размещения рисунка. Рисунки должны быть представлены отдельно в одном из форматов *.tif, *.gif, *.png, *.jpg, *.wmf с разрешением 600 dpi.
- Математические формулы в тексте должны быть набраны как объект Microsoft Equation или MathType. Химические формулы и мелкие рисунки в тексте должны быть вставлены как объекты Рисунок Microsoft Word. Следует нумеровать лишь те формулы, на которые имеются ссылки.

К статье прилагаются следующие документы:

- 2 рецензии высококвалифицированных специалистов (докторов наук) в соответствующей отрасли науки;
- выписка из протокола заседания кафедры или методического совета с рекомендацией к печати;
- акт экспертизы (экспертное заключение);
- сведения об авторах (в бумажном и электронном виде): ФИО (полностью), наименование организации и ее полный адрес, должность, ученая степень, телефон, e-mail.

Текст должен быть тщательным образом выверен и отредактирован. В конце статья должна быть подписана автором с указанием домашнего адреса и номеров служебного и домашнего телефонов, электронной почты.

Статьи, оформление которых не соответствует указанным требованиям, к публикации не допускаются.

Ответственный секретарь к.ф.-м.н. В.А. Витюк
тел. (722-51) 3-33-35, E-mail: VITYUK@NNC.KZ

Технический редактор И.Г. Перепелкин
тел. (722-51) 3-33-33, E-mail: IGOR@NNC.KZ

Адрес редакции: 071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 2, зд. 054Б
<http://old.nnc.kz/zhurnalvestnik.html>

© Редакция сборника «Вестник НЯЦ РК», 2017

Регистрационное свидетельство №1203-Ж от 15.04.2000 г.
Выдано Министерством культуры, информации и общественного согласия Республики Казахстан

Тираж 300 экз.

Выпуск набран и отпечатан в типографии
Национального ядерного центра Республики Казахстан
071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 2, зд. 054Б

