

NATIONAL RESEARCH NUCLEAR UNIVERSITY MEPhI

GLOBAL NUCLEAR SAFETY

2019, 1(30)

Founded in November, 2011

The subscription index is 10647 in the catalogue «Press of Russia»

Quarterly

ISSN 2305-414X, reg. № FS77-47155, November, 3 2011

Web-site: <http://gns.mephi.ru>

Editor-in-Chief:

M.N. Strikhanov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (*Russia*)

Editorial Staff:

M.N. Strikhanov, Editor-in-Chief, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (*Russia*)

V.A. Rudenko, Deputy Editor-in-Chief, Doctor of Sociology, Professor (*Russia*)

Denis Flory, Deputy CEO of IAEA (*Austria*)

Liu Daming, Professor of the Chinese Nuclear Power Institute, CIAE (*China*)

Nancy Fragoyannis, Senior Counsellor of the USA Nuclear Regulation Commission (*USA*)

Buhach Andrzej, Doctor of Technical sciences, Professor (*Poland*)

M.K. Skakov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (*Kazakhstan*)

A.D. Malyarenko, Doctor of Technical sciences, Professor (*Belarus*)

S.E. Gook, PhD Technical Science (*Germany*)

P.D. Kravchenko, Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)

A.P. Elokhin, Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)

A.V. Chernov, Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)

Y.I. Pimshin, Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)

Y.P. Mukha, Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)

V.V. Krivin, Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)

V.I. Ratushny, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (*Russia*)

Y.S. Sysoev, Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)

A.V. Palamarchuk, PhD Technical sciences (*Russia*)

A.A. Salnikov, PhD Technical sciences (*Russia*)

V.E. Shukshunov, Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)

V.P. Povarov, PhD Physics and Mathematics (*Russia*)

S.M. Burdakov, PhD (Technical sciences), associate professor (*Russia*)

I.A. Bublikova, PhD (Technical sciences), associate professor (*Russia*)

Founder:

National Research Nuclear University MEPhI

Editorial address:

Kashirskoe shosse 31, Moscow, 115409, Russia

Lenin Street, 73/94, Rostov region, Volgodonsk, 347360, Russia

telephone: (8639)222717, e-mail: oni-viti@mephi.ru

Press address:

Lenin Street, 73/94, Rostov region, Volgodonsk, 347360, Russia.

Moscow

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

2019, 1(30)

Журнал основан в ноябре 2011 г.
Подписной индекс в объединенном каталоге «Пресса России» – 10647
Выходит 4 раза в год, ISSN 2305-414X
Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-47155 от 3.11.2011 г.
Журнал включен в перечень ВАК РФ (№504)
Группы научных специальностей:
05.14.00 – Энергетика;
05.26.00 – Безопасность деятельности человека;
05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление.

Web-site: <http://gns.mephi.ru>

Главный редактор:

М.Н. Стриханов, доктор физико-математических наук, профессор (Россия)

Редакционная коллегия:

М.Н. Стриханов, главный редактор, д-р физ.-мат. наук, проф. (Россия)
В.А. Руденко, заместитель главного редактора, д-р соц. наук, проф. (Россия)
Денис Флори, заместитель генерального директора МАГАТЭ (Австрия)
Лю Дамин, проф. Китайского института ядерной энергетики (Китай)
Нэнси Фрагояннис, старший советник Комиссии по ядерному регулированию США (США)
Бухач Андржей, д-р техн. наук, проф. (Польша)
М.К. Скаков, д-р физ.-мат. наук, проф. (Казахстан)
А.Д. Маляренко, д-р техн. наук, проф. (Беларусь)
С.Э. Гоок, к-т техн. наук (Германия)
П.Д. Кравченко, д-р техн. наук, проф. (Россия)
А.П. Елохин, д-р техн. наук, проф. (Россия)
А.В. Чернов, д-р техн. наук, проф. (Россия)
Ю.И. Пимишин, д-р техн. наук, проф. (Россия)
Ю.П. Муха, д-р техн. наук, проф. (Россия)
В.В. Кривин, д-р техн. наук, проф. (Россия)
В.И. Ратушный, д-р физ.-мат. наук, проф. (Россия)
Ю.С. Сысоев, д-р техн. наук, проф. (Россия)
А.В. Паламарчук, к-т техн. наук (Россия)
А.А. Сальников, к-т техн. наук (Россия)
В.Е. Шукинунов, д-р техн. наук, проф. (Россия)
В.П. Поваров, к-т физ.-мат. наук (Россия)
С.М. Бурдаков, к-т техн. наук, доц. (Россия)
И.А. Бубликова, к-т техн. наук, доц. (Россия)

Учредитель:

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Адрес редакции: 115409, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, 31;
347360, Россия, Ростовская обл., г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94,
тел. (8639) 222717, e-mail: oni-viti@mephi.ru
Адрес типографии: 347360, Россия, Ростовская обл., г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94.

Москва

CONTENTS

2019, 1(30)

THE PROBLEMS OF NUCLEAR, RADIATION AND ECOLOGICAL SAFETY

- Passive Protection Development of the Mobile Unit of Nuclear and Radiation Hazardous Objects
O.A. Gubeladze, A.R. Gubeladze..... 7
- Water Quality Assessment on Sanitary-Hygienic Parameters of Neman River at Baltic Power Plant (Under Construction) Region
E.V. Luneva, E.A. Vereshchagina, D.V. Kulakov, M.E. Makushenko..... 16

RESEARCH, DESIGN, CONSTRUCTION AND INSTALLATION OF NUCLEAR FACILITIES MANUFACTURING EQUIPMENT

- Application of the Expert System for Assessing of the Stress-Strain State of Nuclear Power Plant Containments at the Stage of Construction and Operation
V.N. Medvedev, Aleksandr S. Kiselev, Aleksei S. Kiselev, V.F. Strizhov, A.N. Ul'yanov, M.I. Skorikova..... 25
- Assess of Possibility of Eu_2O_3 Using as Burnable Absorber in WWER-1200 Reactor
M.A. Abu Sondos, V.M. Demin, V.I. Savander..... 39
- Monitoring and Regulation System of Penetration Depth at Argon-Arc Welding of Important Products on Welding Pool Oscillation
Eh.A. Gladkov, N.A. Simakova, R.A. Perkovskij, T.V. Brodyagina..... 47
- Principle of Accuracy Calculation of Measurements during Deformation Process Monitoring
Yu.I. Pimshin, Yu.V. Zayrov, G.A. Naumenko..... 59
- Elements for Solar Batteries on the GaInAs Nanostructure Basis Obtained by Ion-Beam Deposition Method
I.A. Sysoev, D.A. Gusev, A.E. Dembitsky, A.Yu. Smolin, V.F. Kataev..... 67

NUCLEAR FACILITIES EXPLOITATION

- The Current Digital Logical Elements and IP-Modules for Problems of Automatic Control and Monitoring of Nuclear Objects
N.V. Butyrlagin, N.I. Chernov, N.N. Prokopenko, A.V. Bugakova..... 74
- Compare the Result of Uncertainty Analysis in the Physical Calculations of WWER

Cells in the Daily Maneuvering Schedule by GETERA and WIMS Programs <i>Rahman S.K. Anisur, M.A.Uvakin</i>	90
Design Version of the Device, Exact Positioning of the Gripper for Lifting the Fallen Cassettes in the WWER Reactor <i>P.D. Kravchenko, D.N. Fedorenko, Yu.P. Kosogova</i>	101
Using Entropy Methods of Processing Video Images to Control NPP Equipment <i>O.E. Draka, E.A. Abidova, A.V. Chernov, O.I. Beysug, A.V. Blagin</i>	106
Assessment of Erosion and Corrosion Deterioration Development Using Magnetic Anisotropy Measurement Method <i>A.K. Adamenkov, I.N. Veselova, V.Y. Shpitser</i>	113
SAFETY CULTURE, SOCIO AND LEGAL ASPECTS OF TERRITORIAL DEVELOPMENT OF NUCLEAR FACILITIES LOCATION	
Responsibility for Stealing or Extortion of Nuclear Materials and Radioactive Substances <i>N.S. Aleksandrova</i>	120
Effective Training Practices for Rosatom Export-Oriented Strategy Implementation <i>V.A. Rudenko, M.V. Golovko, Yu.A. Evdoshkina, N.P. Vasilenko</i>	124
Author Index of vol. 1, 2019	138

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 1(30), 2019

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

- Разработка пассивной защиты подвижного агрегата с ядерно- и радиационно опасным объектом
О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе 7
- Оценка качества вод реки Неман по санитарно-гигиеническим показателям в районе строящейся Балтийской АЭС
Е.В. Лунева, Е.А. Верещагина, Д.В. Кулаков, М.Е. Макушенко 16

ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

- Применение экспертной системы оценки напряженно-деформированного состояния защитных оболочек АЭС на этапе сооружения и эксплуатации
В.Н. Медведев, Александр С. Киселев, Алексей С. Киселев В.Ф. Стрижов, А.Н. Ульянов, М.И. Скорикова 25
- Оценка возможности использования Eu_2O_3 в качестве выгорающего поглотителя в реакторе ВВЭР-1200
М.А. Абу Сондос, В.М. Демин, В.И. Савандер 39
- Система контроля и регулирования глубины проплавления при аргонодуговой сварке ответственных изделий по осцилляции сварочной ванны
Э.А. Гладков, Н.А. Симакова, Р.А. Перковский, Т.В. Бродягина 47
- Принцип расчета точности измерений при выполнении контроля деформационных процессов
Ю.И. Пимишин, Ю.В. Заяров, Г.А. Науменко 59
- Элементы для солнечных батарей на основе наноструктур GaInAs, полученные методом ионно-лучевого осаждения
И.А. Сысоев, Д.А. Гусев, А.Е. Дембицкий, А.Ю. Смолин, В.Ф. Катаев 67

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

- Токовые цифровые логические элементы и ip-модули для задач автоматического управления и контроля ядерными объектами
Н.В. Бутырлагин, Н.И. Чернов, Н.Н. Прокопенко, А.В. Бугакова 74
- Сравнение результатов анализа неопределенности в физических расчетах ячеек ВВЭР в суточном графике маневрирования двумя программами GETERA и WIMS
Рахман С.К. Анисур, М.А. Увакин 90

Вариант конструктивного исполнения устройства точного позиционирования захвата для подъема упавших кассет в реакторе типа ВВЭР <i>П.Д. Кравченко, Д.Н. Федоренко, Ю.П. Косогова</i>	101
--	-----

Использование энтропийных методов обработки видеоизображений для контроля состояния оборудования АЭС <i>О.Е. Драка, Е.А. Абидова, А.В. Чернов, О.И. Бейсуг, А.В. Благин</i>	106
--	-----

Оценка развития эррозионно-коррозионного износа с помощью метода измерения магнитной анизотропии <i>А.К. Адаменков, И.Н. Веселова, В.Я. Штицер</i>	113
---	-----

КУЛЬТУРА БЕЗОПАСНОСТИ И СОЦИАЛЬНО-ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Ответственность за хищение или вымогательство ядерных материалов и радиоактивных веществ <i>Н.С. Александрова</i>	120
--	-----

К вопросу об эффективных практиках подготовки кадров для реализации экспортоориентированной стратегии ГК «Росатом» <i>В.А. Руденко, М.В. Головки, Ю.А. Евдошкина, Н.П. Василенко</i>	124
---	-----

Авторский указатель номера 1(30), 2019	138
--	-----

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 539.42: 623.45

РАЗРАБОТКА ПАССИВНОЙ ЗАЩИТЫ ПОДВИЖНОГО АГРЕГАТА С ЯДЕРНО- И РАДИАЦИОННО ОПАСНЫМ ОБЪЕКТОМ

© 2019 О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе

Донской государственный технический университет, Волгодонск, Ростовская обл., Россия

Совершенствование средств защиты подвижных ядерно- и радиационно опасных объектов (ЯРОО) от воздействия кинетических ударников должно осуществляться за счет применения новых материалов, использования многослойных конструкций с разнесенными и разноориентированными слоями, использования свойств рикошета, преломления траектории ударника при прохождении преграды. В статье представлены некоторые результаты экспериментальных исследований направленных на принятие конструктивно-технических решений, реализующих различные принципы защиты подвижных ЯРОО.

Ключевые слова: обычные средства поражения, кинетические ударники, защитный экран, ядерно- и радиационно опасный объект.

Поступила в редакцию 18.02.2019

После доработки 28.02.2019

Принята к публикации 01.03.2019

Проблема совершенствования средств защиты подвижных ядерно- и радиационно опасных объектов (ЯРОО) от воздействия обычных средств поражения является весьма актуальной, это обусловлено несколькими факторами: неудовлетворительной стойкостью или полным отсутствием средств защиты на некоторых ЯРОО от воздействия стрелкового оружия и средств ближнего боя; постоянным совершенствованием обычных средств поражения; наличием угрозы террористических акций на подобных объектах с применением стрелкового оружия; необходимостью обеспечения защиты ЯРОО не только от целенаправленного деструктивного воздействия, но и от случайного воздействия кинетических ударников различной природы в результате нештатных ситуаций. К настоящему времени разработано и предложено большое количество конструктивно-технических решений, реализующих различные принципы защиты объектов от воздействия кинетических ударников. Однако проблема окончательно не снята с повестки дня. Дальнейшие исследования должны быть направлены на поиск возможности защиты объектов посредством применения новых материалов, использования многослойных конструкций с разнесенными и разноориентированными слоями, использования свойств рикошета, преломления траектории ударника при прохождении преграды и т.д.

В опубликованных ранее трудах [1-7] были представлены некоторые результаты исследований, включающих разработку: организационных и технических мероприятий, направленных на повышение защищенности подвижного агрегата с ядерной энергетической установкой (ЯЭУ) от воздействия высокоскоростных ударников [1-5]; методик оценки последствий нерегламентированных воздействий на взрывоопасный объект с ЯЭУ [6,7]. Так в статье [1] рассмотрена задача выбора критерия оценки стойкости мобильного объекта с защитной конструкцией, решение динамических

контактных задач взаимодействия ударника цилиндрической формы с преградой по нормали численными методами представлено в работе [2]. В монографии [3] подробно исследуется плоское движение абсолютно твердого удлиненного ударника цилиндрической формы при пробивании им тонкой преграды под углом. Результаты исследования процесса взаимодействия ударника с двухслойной мишенью («пластина – вязкая среда») под различными углами опубликованы в работах [3, 4].

В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований, которые могут быть использованы при разработке защитного экрана для мобильного агрегата с ЯЭУ. Для изготовления защитных экранов используются различные конструкционные материалы, как однородные, так и композиционные, а сама конструкция экрана может быть однослойной и многослойной [8].

На рисунке 1 приводятся результаты эксперимента, которые позволили установить взаимосвязь между характерными признаками повреждений (диаметр пробоины) и характеристиками средств поражения. В качестве боеприпасов использовались: для АК-74 и АКМ патроны с пулей ПС (соответствующего калибра); для СВД и ДШКМ патроны с бронебойно-зажигательной пулей. Здесь также представлены результаты, когда некоторые образцы из АМг-6 были размещены за экраном из того же материала (рис. 1б).

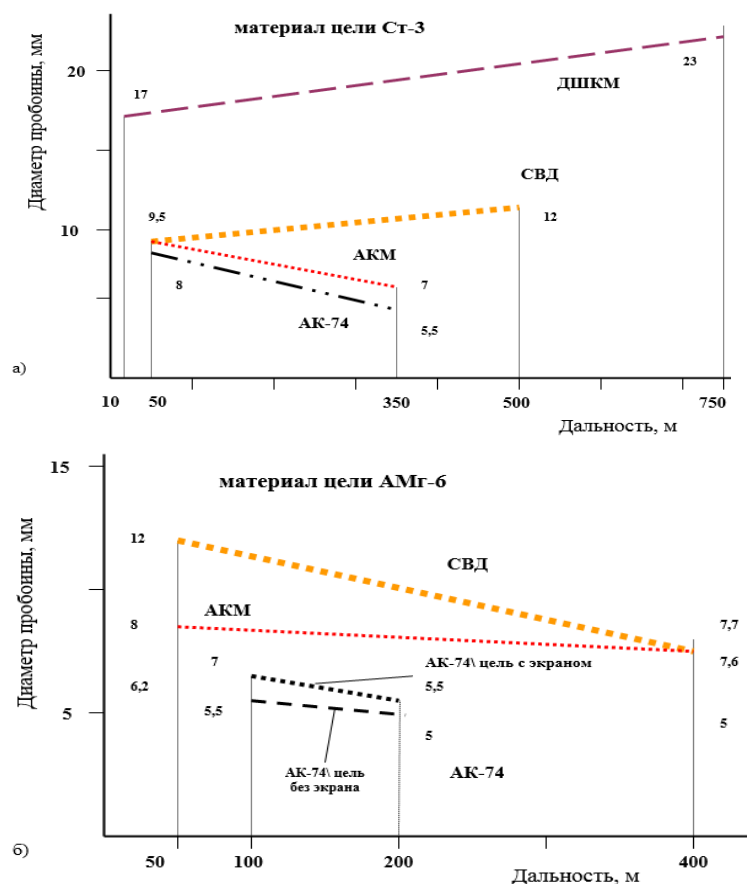


Рисунок 1 – Результаты эксперимента (взаимосвязь между характерными признаками повреждений и характеристиками средств поражения) [The results of the experiment (the relationship between the characteristics of damage and characteristics of destruction means)]

Полученные результаты остаточной скорости ударника сравнивались с результатами численных исследований. Скорость ударника за экраном вычислялась по методике [2]. Критическая скорость пробития преграды может быть определена по формуле (1):

$$v_{кр} = \left[v_{nn}^2 - v_{zn}^2 \exp \left(2\chi^* \cdot \frac{m_n}{m_0} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где m_n – масса материала преграды, выбитого ударником;

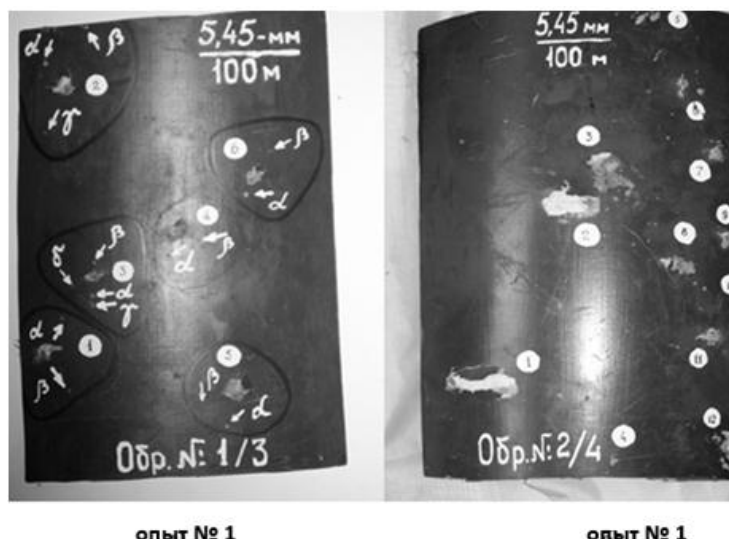
χ^* – уточненный параметр;

m_0 – масса ударника.

Из выражения (1) определим v_{zn} . С учетом того, что при скоростях $\sim 0,3 \div 1,0$ км/с сопротивляемость проникновению ударника $f = H_\delta + \chi^* \rho_n v_{nn}$, получим

$$v_{zn} = \left[\frac{v_{nn}^2}{\exp \left(2\chi^* \frac{m_n}{m_0} \right)} - \frac{H_\delta}{\chi^* \rho_n} \left[\exp \left(2\chi^* \frac{m_n}{m_0} \right) - 1 \right] \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

С целью определения характерной формы дефектов корпуса объекта проведено экспериментальное исследование (рис. 2). **Опыт 1.** Образцы (стеклопластиковое покрытие и силовая оболочка [АМГ-6]) подвергались воздействию ударников (диаметр 5,45-мм; масса 0,0034 кг) с дистанции 100 метров после пробивания ими однослойного защитного экрана (АМГ-6). **Опыт 2.** Использовались те же ударники, что и в опыте № 1. Образцы устанавливались в положение, обеспечивающее углы встречи ударников с поверхностью от 0 до 90°. Перед образцами размещались два экрана (однослойный из [АМГ-6] и многослойный [сталь + ППН + сталь]). На рисунке представлен один из образцов.



Опыт № 1

Опыт № 1

Рисунок 2 – Образцы после воздействия ударников [Samples after exposure to percussionists]

Анализ результатов показал:

- с отклонением до $\approx 20^\circ$ от нормали (углы встречи с поверхностью 70-90°) форма дефектов кратерообразная (каверна) или сквозное отверстие (пробой);
- канавообразный дефект отмечается при углах встречи 12-22° (опыт № 2);
- в некоторых случаях отмечалось внедрение ударника (пули) в покрытие

образца без рикошета (образец 2/4, дефект № 2 с деформацией силовой оболочки);

– поперечный размер осколков экрана, воздействовавших на образцы, достигал 9 мм (опыт № 1) и 16 мм (опыт №2), следовательно, при размещении дополнительных экранов, ожидается увеличение размеров осколков, воздействующих на мишень.

На рисунке 3 представлен образец (АМг-6 с многофункциональным покрытием) с результатами воздействия ударника (сталь) после прохождения защитного экрана (АМг-6) и без. Экран устанавливался перед образцом на расстоянии 50 мм.

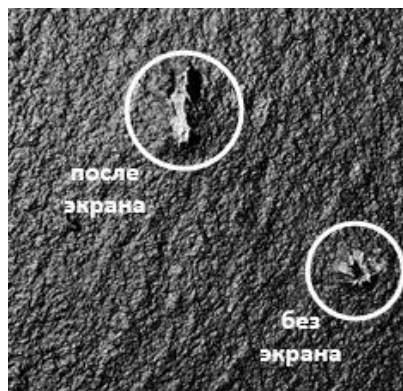
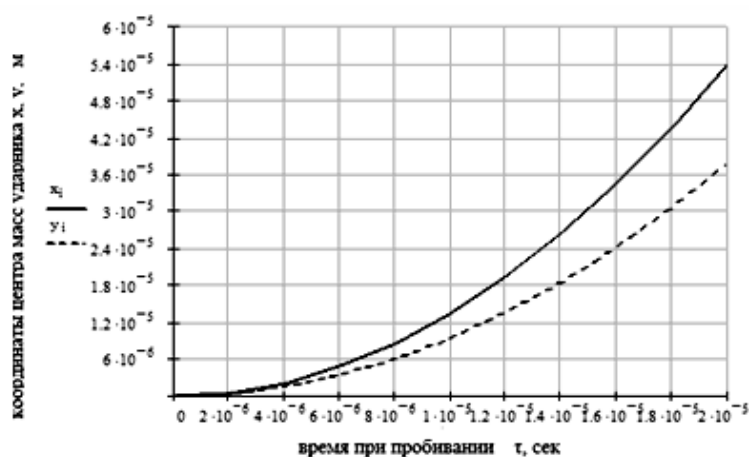
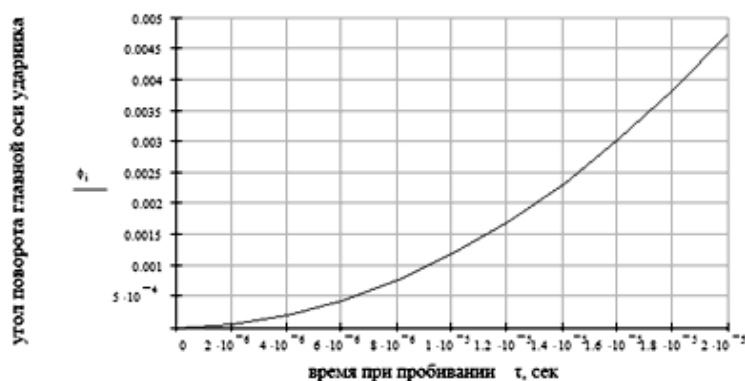


Рисунок 3 – Результаты воздействия ударника [The impact of firing pin]



а)



б)

Рисунок 4 – Зависимость изменения координат центра масс ударника (а) и угла поворота главной оси ударника (б) от времени при пробивании преграды [The dependence of firing pin mass coordinate center changing (a) and angle of the firing pin main axis (b) from time to time when launching new barriers]

На рисунке 4 представлены результаты расчета изменения значений координат x , y центра масс ударника (сталь) и угла поворота главной оси ударника φ после пробивания преграды (АМг-6). Геометрические размеры ударника брались следующими $R=2,0$ мм, $L=15$ мм, масса $m=1,4$ г, угол встречи $\beta = 87^\circ$. Скорость движения ударника до встречи с преградой 767 м/с, после пробивания 380 м/с (определялось экспериментально). Толщина преграды $h = 5$ мм.

Как уже отмечалось – конструкция экрана может быть однослойной и многослойной. Была проведена серия испытаний с одно, двух и трехслойными элементами защиты, имеющих как жесткий контакт между слоями, так и с разнесенными слоями (табл. 1). Толщина образцов варьировалась от 0,001 м до 0,003 м. Полученные результаты остаточных скоростей ударника ΔV сравнивались с результатами численных исследований.

Таблица 1 – Результаты испытаний [Test results]

Материал преграды		Толщина слоев, мм	ΔV , м/с
одно- слойная	АМг6	1,0	17
	АМг6	1,5	43
	АМг6	2,0	67
	АМг6	3,0	162
АМг6		1,0+1,0	80
АМг6		1,0+1,0+1,0	176
АМг6		1,0+10,0*+1,0	96
* - расстояние между разнесенными слоями (мм)			

В другой серии испытаний двухэлементной разнесенной преграды в качестве первого слоя использовался лист (сталь) толщиной 1,8 мм, а второго слоя – пакет из трех таких же слоев, находящихся в жестком контакте (5,4 мм). Фронтальный лист и пакет расположены на расстоянии 42 мм. После пробития первого листа пуля деформировалась, но сохраняла свою целостность, а при контакте с пакетом сердечник вдавливался в лист без сквозного пробития. В случае применения в качестве фронтального пакета толщиной после пробития выходит оголенный сердечник.

Исследования воздействия ударников с образцами многослойных конструкций экрана позволили определить, что при одинаковой суммарной толщине слоев преграды в целом, разные сочетания листов дают разные результаты (пробитие – непробитие) (рис. 5).

В эксперименте испытывалась двухслойная преграда. Скорость ударника перед преградой 140 м/с, диаметр ударника 4,5 мм, масса 0,52 г. В первом случае (рис. 5,а) наблюдается сквозное пробивание преграды ($v_{зп} = 31,5$ м/с), в другом случае (рис. 5,б) наблюдается частичное повреждение преграды, при котором часть ударников образует «вздутие» последнего слоя, остальные остаются в преграде с образованием лепестковой пробоины.

Для многослойной преграды в выражении (2) последний член, записанный с учетом многослойности, имеет вид:

$$\sum_{i=1}^N \frac{H_{\partial i}}{\chi^* \rho_{ni}} \left[\exp \left(2\chi^* \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{m_0} \right) - 1 \right]. \quad (3)$$

Величина $\exp \left(2\chi^* \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{m_0} \right)$ имеет максимальное значение для последнего слоя,

поэтому в качестве последнего слоя для многослойной защиты следует выбирать слой

с наибольшим значением отношения H_o / ρ_n , а первый с наименьшим. Тогда преграда будет оказывать максимальное сопротивление пробиванию.

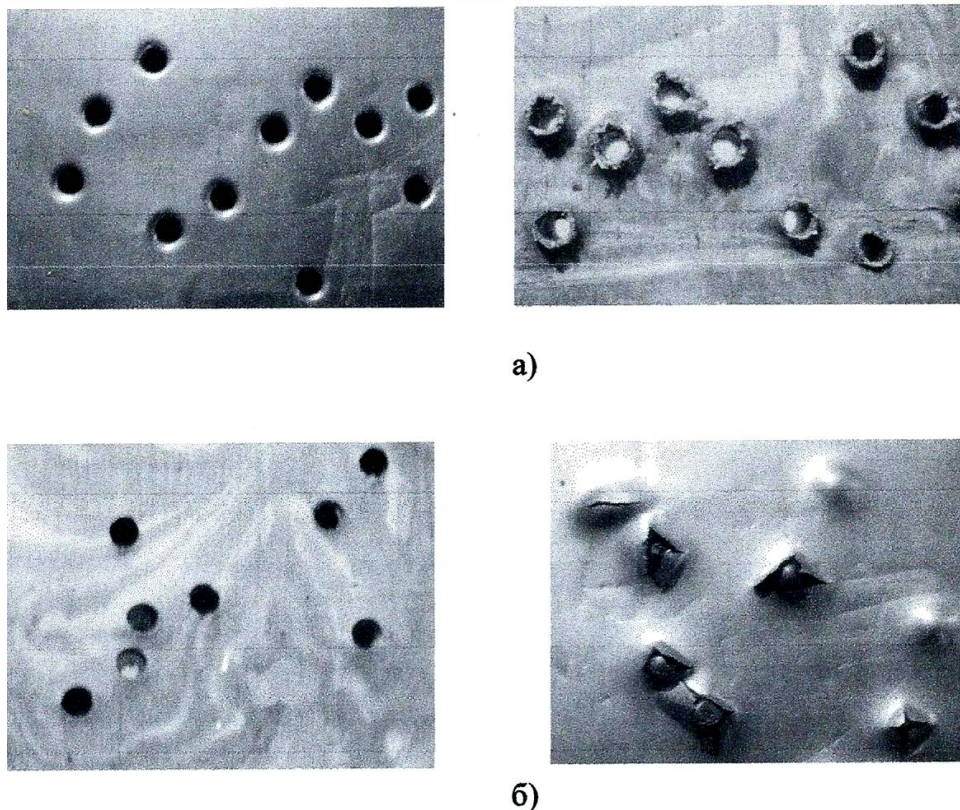


Рисунок 5 – Пробитие двухслойной преграды: а) металл – пластичная среда; б) пластичная среда – металл [Double-layer break barriers a) metal-plastic medium; b) plastic medium -metal]

С целью оценки проектных параметров и сравнения различных вариантов защитных экранов для минимальных значений массовых и энергетических характеристик рассматривается задача статической оптимизации. Ограничения по массе и габаритам заставляют рассматривать легкие конструкционные материалы с соответствующими физико-механическими характеристиками.

На рисунке 6 представлены образцы (АМг-6 с многофункциональным покрытием) с результатами воздействия ударника (пуля патрона 7Н6ВК) (рис. 6 в, г) после прохождения трехслойного защитного экрана (стеклопластик-ППН-стеклопластик) (рис.6 а, б).

В данном эксперименте при пробивании фрагментов конструкции под прямым углом пуля, попадая в трехслойный экран, оставляет в нем свою оболочку и свинцовую рубашку, и при выходе из экрана воздействует на образец боковой поверхностью стального сердечника ($R=2,0$ мм, $L=15$ мм, масса $m=1,4$ г), что хорошо видно на рисунке 6,в.

Трехслойный экран подвергался обстрелу под различными углами. На рисунке 7 представлены результаты воздействия под углами 17° (рис.7а) и 15° (рис.7б).

При пробивании внешнего слоя (стеклопластик) пуля теряет оболочку и свинцовую рубашку, пройдя второй слой (ППН) сердечник подходит к последнему слою под углом $10-11^\circ$ и, отражаясь от него, остается внутри экрана.

Полученные результаты позволили принять ряд конструктивно-технических решений по пассивной защите подвижного агрегата с ядерной энергетической установкой от воздействия высокоскоростных ударников [8-11].

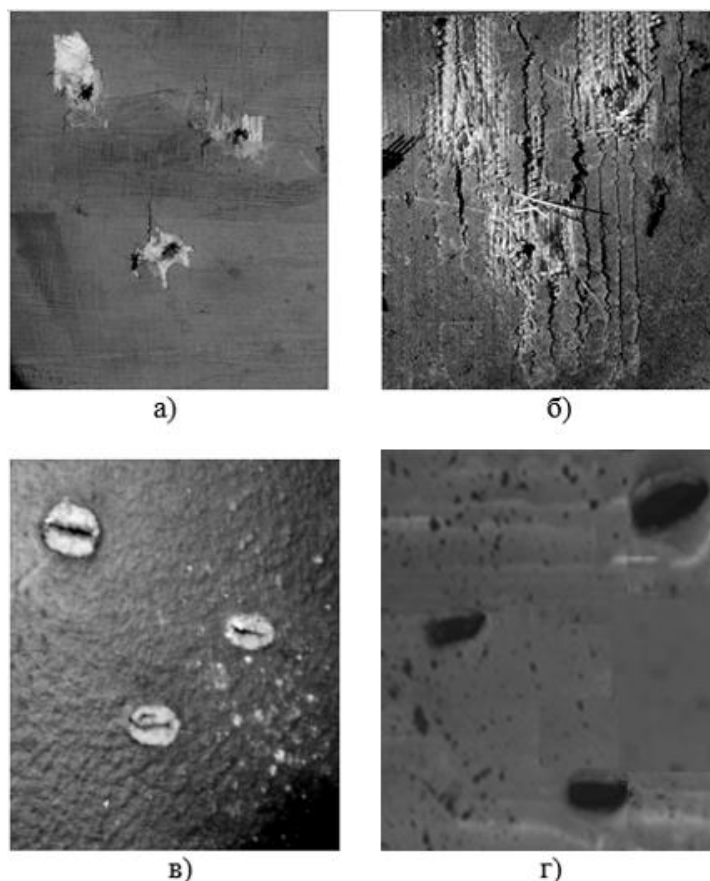


Рисунок 6 – Результаты эксперимента: а – многослойный экран (фронт); б – многослойный экран (тыл); в – образец (фронт); г – образец (тыл) [The results of the experiment: a – multi-layer screen (front); b – multi-layered screen (rear); c – sample (front); d – sample (rear)]

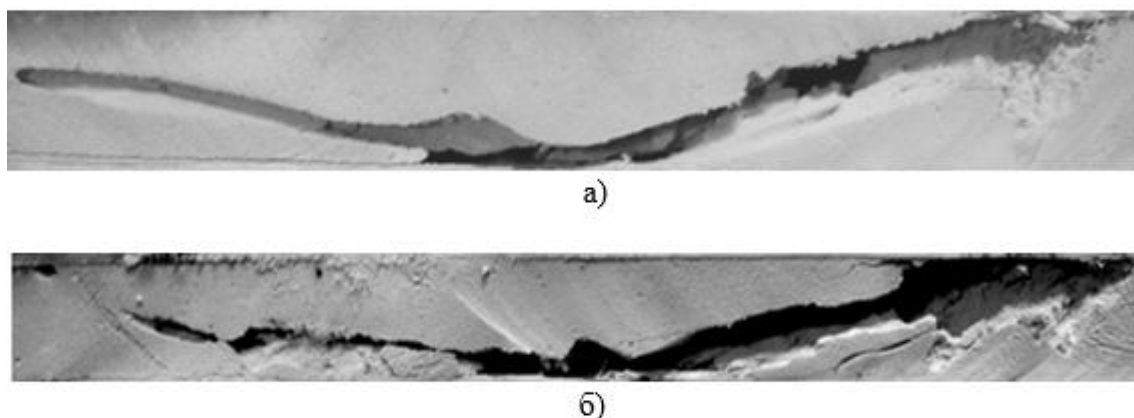


Рисунок 7 – Фрагмент трехслойного экрана [Slice three-layered screen]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губеладзе, О.А. Выбор критерия оценки стойкости транспортно-упаковочного комплекта с ядерно- и радиационно опасным объектом [Текст] / О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе, С.М. Бурдаков // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 4 (21). – С. 16-21.
2. Губеладзе, О.А. Моделирование высокоскоростного удара [Текст] / О.А. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – № 1 (14). – С. 61-69.
3. Денисов, О.В. Комплексная безопасность населения и территорий в чрезвычайных ситуациях. Проблемы и решения: моногр. [Текст] / О.В. Денисов, О.А. Губеладзе, Б.Ч. Месхи, Ю.И. Булыгин; под общ. ред. Ю.И. Булыгина. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2016. – 278

- с.
4. Губеладзе, О.А. Исследование движения высокоскоростного ударника в многофункциональном покрытии перспективной конструкции контейнера с установкой, содержащей ядерноопасные делящиеся материалы [Текст] / О.А. Губеладзе, С.В. Федоренко, П.О. Губеладзе // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2010. № S (спецвыпуск). – С. 134-136.
5. Губеладзе, О.А. Исследование эффективности системы охраны подвижного ядерно- и радиационноопасного объекта [Текст] / О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе, С.М. Бурдаков // Глобальная ядерная безопасность. – 2018. – № 1 (26). – С. 36-46.
6. Губеладзе, О.А. Оценка результатов нерегламентированных воздействий на взрывоопасный объект [Текст] / О.А. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2011. – №1 (1). – С. 61-63.
7. Губеладзе, О.А. Экспресс-оценка результатов нерегламентированных деструктивных воздействий на ядерно- и радиационноопасный объект [Текст] / О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2018. – №4 (29). – С. 24–30.
8. Сахабуудинов, Р.В. Научно-методические основы обеспечения физической защиты ядерноопасных объектов [Текст] / Р.В. Сахабуудинов, О.А. Губеладзе. – Ростов-на-Дону: ООО «Терра», 2006. – 153 с.
9. Пат. Российская Федерация 2211434, МПК(51) F41H 5/04 (2000.01) F41H 11/08(2000.01) Защитное ограждение [Текст] / Краснов А.А., Ткачев В.П., Сахабуудинов Р.В. заявитель и патентообладатель, Краснов А.А., Ткачев В.П. № 2002116356/02; заявл. 17.06.02; опубл. 27.08.03. Бюл. № 24 – 8 с.
10. Пат. Российская Федерация 2229675, МПК(51) F41H 5/14 (2000.01) Мобильный разветвляемый защитный экран [Текст] / Краснов А.А., Ткачев В.П., Сахабуудинов Р.В.; заявитель и патентообладатель, Краснов А.А., Ткачев В.П. № 2003106026/02; заявл. 03.03.03 опубл. 27.05.04. Бюл. № 15 – 13 с.
11. Пат. Российская Федерация 2399857, МПК(51) F41H 7/00 (2006.01) Бронетранспортер с трансформируемым защитным экраном [Текст] / Краснов А.А., Сахабуудинов Р.В., Федоренко С.В.; заявитель и патентообладатель, Краснов А.А., Сахабуудинов Р.В. № 2009143302/02; заявл. 25.11.09 опубл. 20.09.10. Бюл. № 26 – 8 с.

REFERENCES

- [1] Gubeladze O.A., Gubeladze A.R., Burdakov S.M. Vybor kriterija otsenki stoykosti transportno-upakovochного комплекта s jaderno- i radiatsionno opasnym ob'ektom [Criterion Choice for Evaluation of Transport and Packing Set Firmness with Nuclear and Radiation Dangerous Object]. Global'naya yadernaya bezopasnost [Global Nuclear Safety]. 2016. № 4. P. 16-21 (in Russian).
- [2] Gubeladze, O.A. Modelirovanie vysokoskorostnogo udara [Modeling of High-Speed Blow]. Global'naya yadernaya bezopasnost [Global Nuclear Safety]. 2015. №1. P. 61-69 (in Russian).
- [3] Denisov O.V., Gubeladze O.A., Meskhi B.Ch., Bulygin Yu.I. Kompleksnaya bezopasnost' naseleniya i territoriy v chrezvychaynykh situatsiyakh. [Complex Safety of the Population and Territories in Emergency Situations. Problems and Solutions]. Rostov on Don. Don State technical university [Publishing center of Don State technical university]. 2016. 278 p. (in Russian).
- [4] Gubeladze O.A., Fedorenko S.V., Gubeladze P.O. Issledovanie dvigeniya vysokoskorostnogo udarnika v mnogofunktsionalnom pokrytii perspektivnoy konstruktssii kontejnera s ustanovkoj, sodergashchej jadernoopasnye deljashchiesja materialy [Study of High-Speed Traffic Drummer in Multifunctional Coating Prospective Container Design to Installation, Contains the Nuclear-Dangerous Fissile Materials] Izvestiya vy'sshix uchebny'x zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Seriya: Texnicheskie nauki [Scientific Educational and Applied Journal. University news of North-Caucasian Region. Technical Science Series. Application]. 2010. Special Issue. P. 134-136 (in Russian).
- [5] Gubeladze O.A., Gubeladze A.R., Burdakov S.M. Issledovanie effektivnosti sistemy okhrany podvignogo jaderno- i radiatsionno opasnogo ob'ekta [Research of the Protection System Effectiveness for a Mobile Nuclear and Radiation Hazardous Facility] Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2018. №1 (26). P. 36-46 (in Russian).
- [6] Gubeladze O.A. Otsenka rezul'tatov nereglamentirovannykh vozdeystviy na vzryvoopasnyy ob'ekt [Estimating of Unregulated Influence Results on Explosive Object]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2011. №1 (1). P. 61-63 (in Russian).
- [7] Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. Ekspress-otsenka rezul'tatov nereglamentirovannykh destruktivnykh vozdeystvij na jaderno- i radiatsionno opasnyj ob'ekt [Express Assessment of Results

- of Independent Destructive Impacts on Nuclear and Radiation-Hazardous Object] *Global'naya yadernaya bezopasnost'* [Global Nuclear Safety]. 2018. №4 (29). P. 24-30 (in Russian).
- [8] Sakhabudinov R.V., Gubeladze O.A. Nauchno-metodicheskie osnovy obespecheniya fizicheskoy zashchity yadernoopasnykh ob'ektov. [Scientific and Methodical Bases of Ensuring Physical Protection of Nuclear-Dangerous Objects]. Rostov-on-Don. «LLC Terra» [«Terra» Limited Liability Company]. 2006. 153 p. (in Russian).
- [9] Krasnov A.A., Tkachev V.P., Saxabudinov R.V. Zashchitnoe zagragdenie [Protective Boom]. Patent RF, № 2211434, 2003 (in Russian).
- [10] Krasnov A.A., Tkachev V.P., Saxabudinov R.V. Mobilnyj razvertyvaemyj zashchitnyj ekran [Mobile Expandable Protective Screen]. Patent RF, № 2229675, 2004 (in Russian).
- [11] Krasnov A.A., Saxabudinov R.V., Fedorenko S.V. Bronetransporter s transformiruемым ekranom [Armored Personnel Carrier with Transformable Protective Screen]. Patent RF, № 2399857, 2009 (in Russian).

Passive Protection Development of the Mobile Unit of Nuclear and Radiation Hazardous Objects

O.A. Gubeladze¹, A.R. Gubeladze²

Don State Technical University, Gagarin square 1, Rostov-on-Don, Russia, 344000

¹ORCID iD: 0000-0001-6018-4989

WoS Researcher ID: F-6921-2017

e-mail: buba26021966@yandex.ru

²ORCID iD: 0000-0002-6966-6391

WoS Researcher ID: F-7215-2017

e-mail: buba26021966@yandex.ru

Abstract – Improving the means of protecting mobile nuclear and radiation hazardous objects (NRHFs) from kinetic impactors should be achieved through the use of new materials, the use of multilayer structures with separated and multi-oriented layers, the use of rebound properties, and the refraction of the impactor's trajectory during the passing through barrier. The article presents some results of experimental studies aimed at making constructive and technical solutions implementing various principles of mobile NRHF protection.

Keywords: conventional weapons, kinetic impactors, protective shield, nuclear and radiation hazardous object

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 502.051, 502.054

**ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОД РЕКИ НЕМАН ПО САНИТАРНО-
ГИГИЕНИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ В РАЙОНЕ СТРОЯЩЕЙСЯ
БАЛТИЙСКОЙ АЭС**

© 2019 Е.В. Лунева^{*}, Е.А. Верещагина^{**}, Д.В. Кулаков^{**}, М.Е. Макушенко^{***}

^{*} Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» по реализации капитальных проектов, Москва, Россия

^{**} Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия

^{***} Санкт-Петербургское отделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Санкт-Петербург, Россия

Использование поверхностных водных объектов в системах водоснабжения и водоотведения атомных электростанций (АЭС) связано с комплексом проблем обеспечения безопасности населения и окружающей среды. В технологическом цикле охлаждения строящейся Балтийской АЭС (БтАЭС) (Калининградская область РФ) предполагается использовать воду р. Неман. Оценка сезонной динамики качества вод р. Неман в точке проектируемого водосброса по санитарно-гигиеническим показателям проведена в рамках комплексного гидроэкологического мониторинга водных объектов зоны влияния БтАЭС. Воды р. Неман на протяжении большей части года не соответствуют гигиеническим критериям для открытых систем технического водоснабжения. Для получения воды с высокими органолептическими показателями и приемлемым уровнем риска по химическому и микробиологическому составу для оборотной системы водоснабжения строящейся БтАЭС необходимо применение комплекса методов очистки воды, доочистки и обеззараживания. В то же время, пробы воды р. Неман в пределах Калининградской области следует считать не оказывающими токсического действия на плодовитость и выживаемость тест – объекта *Daphnia magna* Straus, 1820.

Ключевые слова: оценка качества воды, микробиологические показатели, гидрохимические показатели, река Неман, Балтийская АЭС.

Поступила в редакцию 17.01.2019

После доработки 28.02.2019

Принята к публикации 04.03.2019

ВВЕДЕНИЕ

Воздействие атомных электростанций (АЭС) на водные экосистемы прилегающих территорий связано со сбросом и забором вод, использующихся в системе технического водоснабжения станции. Сбросные воды АЭС имеют повышенную температуру относительно заборной воды и химический состав, отличающийся от природных вод. В большинстве случаев сброс техногенных вод оказывает отрицательное воздействие на экологические условия в водных объектах и приводит к усилению антропогенной эвтрофикации [1], а также качественным и количественным изменениям в гидробиоценозах. Забор воды из поверхностных водоемов и водотоков для производственных нужд также может воздействовать на живые организмы, способствуя их гибели в результате механического воздействия. Сказанное в полной мере относится и к строящейся Балтийской АЭС (БтАЭС), расположенной в Калининградской области РФ, в технологическом цикле которой для подпитки оборотной системы технического водоснабжения предполагается использовать воду

р. Неман (водотока высшей рыбохозяйственной категории).

В охлаждающей системе АЭС циркулирующая вода многократно нагревается и охлаждается, аэрируется и частично испаряется [2]. В процессе циркуляции происходят повышение минерализации, концентрирование химических и увеличение микробиологических загрязнений. Эпидемиологические и токсикологические факторы загрязненности воды обуславливают приоритет гигиенических критериев при ее использовании для технического водоснабжения. Основопологающим принципом при этом является обеспечение безопасности для здоровья населения, подвергающегося прямому или косвенному воздействию сбросных и восстановленных вод. Требования к качеству используемых в охлаждающей системе и отводимых со станции сбросных вод должны гарантировать для человека безвредность химического состава и благоприятные органолептические свойства воды [2].

При разработке систем водоснабжения АЭС и планировании очистки вод из поверхностных источников должны быть учтены неоднородность химического состава природных вод в пространственном (к примеру, по длине реки) и временном (к примеру, внутригодовая изменчивость стока биогенных элементов) отношении. Оценка качества вод по санитарно-гигиеническим показателям возможна на основании данных комплексного гидроэкологического мониторинга водных объектов зоны влияния АЭС [3].

Целью работы является анализ качества вод р. Неман по санитарно-гигиеническим показателям в современный период и оценка интегральной токсичности среды (методами биотестирования).

Для решения поставленной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- организация санитарно-гигиенических исследований в зоне проектируемого сброса сточных вод;
- расчет удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ) по результатам гидрохимических наблюдений;
- анализ и сравнение полученных результатов с гигиеническими критериями для открытых систем технического водоснабжения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Река Неман берет начало к югу от Минской возвышенности (на территории республики Беларусь), протекает по территории Литвы и Калининградской области РФ (является трансграничной рекой) и впадает в Куршский залив Балтийского моря, образуя дельту. Река Неман имеет около 180 притоков, из которых наиболее крупные реки Юра, Нявежис, Вилия, Шешупе и др.. Район исследований расположен в нижнем течении р. Неман, на участке Калининградской области, между впадением р. Шешупе и дельтой реки.

Основным элементом мониторинга водных экосистем зоны влияния строящейся БтАЭС, проводимого с 2011 г., являются мониторинг источника технического водоснабжения БтАЭС (р. Неман) и основных водных объектов, входящих в 30-км зону вокруг станции. Комплексность гидроэкологических исследований обеспечивается включением в состав работ гидрохимического, радиационного, гидробиологического, санитарно-гигиенического и ихтиологического опробований водных объектов. Исследования качества вод р. Неман по санитарно-гигиеническим показателям проводились ежемесячно с мая по сентябрь 2016 г. в точке проектируемого водосброса строящейся БтАЭС. Отбор проб воды для оценки токсичности методами биотестирования проводился на двух мониторинговых станциях (ст.): ст. 1 – точке проектируемого водосброса строящейся БтАЭС и ст. 2, расположенной в 7 км ниже по

течению от проектируемого водосброса (рис. 1).

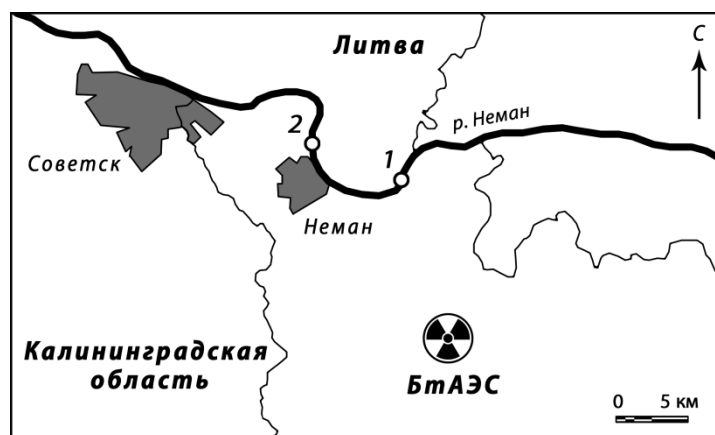


Рисунок 1 – Расположение станций отбора проб на участке водоотведения БтАЭС [Location of sampling stations at the site of the BtNPP sewage]

Отбор проб для гидрохимического и микробиологического анализов, результаты которых использованы для санитарно-гигиенической оценки качества вод, осуществлялся на расстоянии 1,5-3 м от берега с помощью батометра Паталаса объемом 1 л. Анализ отобранных проб выполнялся в аккредитованных лабораториях по стандартным методикам [4].

Токсикологическая оценка качества воды проводилась методами биотестирования на зоопланктоне (*Daphnia magna* Straus, 1820) в акватории р. Неман. Международный стандартный биосигнализатор *Daphnia magna* выбран в качестве типичного представителя звена зоопланктона и важнейшего кормового объекта. Биотестирование осуществлялось, согласно методике [5], по таким показателям как: выживаемость и плодовитость тест-объекта. В остром опыте (48 ч.) оценивалась выживаемость тест-объекта в пробах воды в определенных зонах наблюдения. При продолжении эксперимента, в хроническом опыте (21-24 сут.) фиксировалась не только выживаемость, но и плодовитость опытных самок. Хронические опыты по влиянию тестируемых проб на выживаемость и плодовитость дафний (*Daphnia magna*) продолжались до четвертого вымета молоди тест-организмами. Первый вымет в контроле и в анализируемых пробах начался одновременно на 7 сутки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Химический состав воды речной сети Калининградской области формируется на неоднородных по петрохимическому составу породах, с разнообразным почвенным и растительным покровом территории. Основным источником питания рек района являются снежный покров и атмосферные осадки.

Взаимодействие осадков и талых снеговых вод с подстилающей поверхностью и продуктами хозяйственной деятельности человека обуславливает различия в химическом составе речных вод по площади и во времени года. Содержание химических веществ в водотоках региона изменяются в значительных пределах [5].

На крупных водотоках, таких как р. Неман, влияние местных факторов сказывается в значительно меньшей степени, чем трансформация химического состава воды по мере движения в русле и в местах впадения притоков. В сезонном отношении наименьшие уровни концентрации минеральных веществ наблюдаются при высоких уровнях воды, то есть в половодье и паводки, а наибольшие – в зимнюю межень, когда

водные объекты питаются подземными водами. Обратное распределение характерно для динамики органического вещества. Природные воды р. Неман в соответствии с правилами таксации рыбохозяйственных водных объектов по показателю солёности при характерном солевом составе относятся к группе пресных среднеминерализованных, умеренно-жестких вод, по химическому составу вода гидрокарбонатно-кальциевая [6].

За период мониторинговых исследований, строительные работы, осуществлявшиеся на площадке БТАЭС, фактически не оказывали влияния на водоток.

По результатам гидрохимического мониторинга вод р. Неман как источника технического водоснабжения строящейся БТАЭС, рассчитан удельный комбинаторный индекс загрязнения воды (УКИЗВ) [7] (рис. 2) за период 2011-2016 гг.

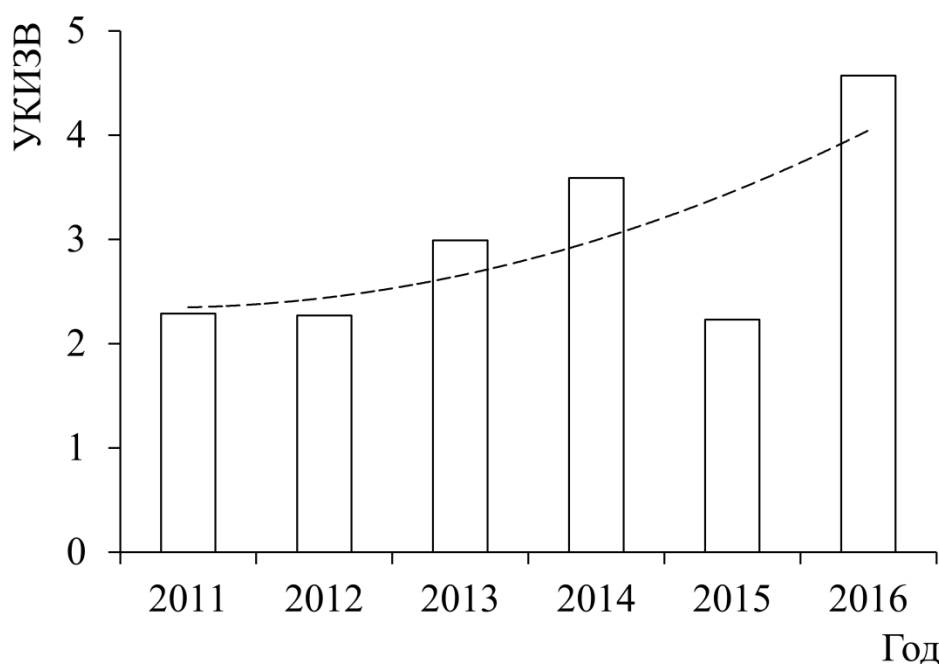


Рисунок 2 – Динамика индекса УКИЗВ для вод р. Неман за период 2011-2016 гг. [Dynamics of remote combinatorial index of water impurity for the Neman waters for the period 2011-2016]

Пунктирной линией на рисунке 2 приведен тренд динамики УКИЗВ за период наблюдений, значения индекса за 2011, 2012 и 2015 гг. находились в пределах от 2 до 3, что соответствует классу «загрязненных» вод, в 2013 и 2014 гг. – от 3 до 4, отнесены к «очень загрязненным» водам, и в 2016 г. индекс УКИЗВ составил более 4, т.е. «грязные» воды [7]. В последний год исследований наблюдается возврат к отрицательной динамике индекса и общему тренду ухудшения статуса качества вод. Улучшение показателей качества вод р. Неман в 2015 г. может быть связано как с гидрологическими особенностями водного объекта (к примеру, высокой водностью года), так и с относительным уменьшением антропогенной нагрузки на водосбор реки. Возврат к отрицательной динамике качества вод в 2016 г. вызывает беспокойство с точки зрения контроля и обеспечения водоснабжения строящейся БТАЭС водой надлежащего качества. Рассмотрим подробнее данные мониторинга за последний год исследований.

Основными загрязнителями р. Неман в нижнем ее течении являются растворенные органические вещества (по показателям БПК₅ и ХПК) (табл. 1) и биогенные вещества (соединения азота аммонийного и нитратного и фосфора фосфатов) природного происхождения (рис. 3).

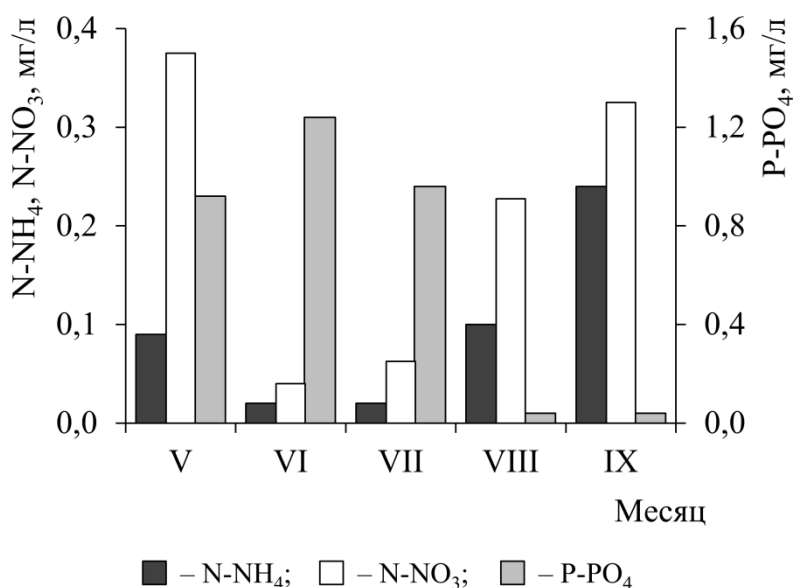


Рисунок 3 – Содержание соединений азота (N) и фосфора (P) в водах р. Неман в 2016 г. [Content of nitrogen compounds (N) and phosphorus (P) in the Neman waters in 2016]

Для показателей содержания минеральных соединений азота в воде, так же, как и для значений величин органического загрязнения по показателям БПК₅ и ХПК, характерна выраженная сезонная динамика, с максимумами в периоды повышенного стока (весна и осень) и минимумами в летний период. Обратный ход сезонной динамики характерен для фосфора фосфатов – содержание элементов имеет высокие значения в весенний период благодаря увеличению поверхностного стока, в том числе, с сельскохозяйственных территорий, и достигает максимальных значений в июле, затем уменьшается и практически сходится на «нет» в конце вегетационного периода благодаря деятельности водных организмов.

Качество вод, используемых в открытых системах водоснабжения, должно быть оценено не только по содержанию химических элементов в воде источника, но и по содержанию микроорганизмов, в том числе, общих и термотолерантных колиформных бактерий (ОКБ и ТКБ) и колифагов (табл. 1).

Таблица 1 – Санитарно-гигиенические показатели качества вод р. Неман в 2016 г. [Sanitary and hygienic indicators of water quality of the Neman in 2016]

Месяц отбора проб	ОКБ, количество бактерий в 100 мл	ТКБ, количество бактерий в 100 мл	Колифаги, количество БОЕ* в 100 мл	Взвешенные вещества, мг/л	БПК ₅ , мгО ₂ /л	ХПК, мгО/л
Май	<50	<50	–	17,2	8,9	30,4
Июнь	2,4×10 ⁴	2,4×10 ⁴	2	9,5	12,5	31,1
Июль	2,4×10 ⁴	2,4×10 ⁴	–	13,6	15,0	40,3
Август	<50	<50	–	9,2	12,5	48,4
Сентябрь	230	<50	4	<3,0	2,9	10,0

Примечание: * – бляшкообразующие единицы; «прочерк» – не обнаружено.

По микробиологическим показателям (ОКБ, ТКБ, колифаги), пробы, отобранные в мае, августе и сентябре 2016 г., соответствовали гигиеническим нормативам [2]. В июне и июле 2016 г. наблюдалось значительное превышение нормативов по содержанию общих и термотолерантных колиформных бактерий – 2,4×10⁴, что указывает на загрязнение участка реки фекальными стоками.

Содержание органических веществ по показателям БПК₅ и ХПК [8], а также

взвешенных веществ, превышало нормативные значения на протяжении практически всего вегетационного периода 2016 года. Только в осенний период воды р. Неман соответствовали гигиеническим критериям для открытых систем технического водоснабжения.

Загрязнение поверхностных водных объектов, как в целом Калининградской области, так и р. Неман, происходит из-за сброса недостаточно очищенных и загрязненных сточных вод, в том числе из-за несанкционированных сбросов [9]. Одними из крупнейших водопотребителей Калининградской области являются предприятия целлюлозно-бумажной промышленности и сельскохозяйственные объекты. Уже в настоящее время река испытывает сильное антропогенное влияние, проявляющееся, главным образом, в повышенном поступлении в водотоки органических и биогенных веществ [10].

В целом, гидрохимические условия р. Неман можно оценить как малоблагоприятные: в воде содержится много органических веществ; из биогенных веществ существенно превышены предельно-допустимые концентрации по аммонийному азоту, фосфору фосфатов и всем формам железа [3].

Проведенные в 2016 г. исследования токсичности вод р. Неман [11] позволили оценить свойства вод как среды обитания водных организмов (табл. 2).

Таблица 2 – Результаты биотестирования проб воды р. Неман в остром опыте (48 ч.) [Biotesting results of water samples of the Neman in the acute experience (48 hours)]

Место отбора проб	Выживаемость, % Экспозиция, ч.		% гибели	Заключение о степени острой токсичности
	24	48		
ст. 1	100,0	100,0	0	не токсична
ст. 2	100,0	100,0	0	не токсична
Контроль*	100,0	100,0	0	не токсична
Примечание: * – вода для разведения и проживания тест-объектов в лабораторных условиях.				

Примечание: * – вода для разведения и проживания тест-объектов в лабораторных условиях.

В опытах с экспозицией 48 ч., острой токсичностью исследованные пробы воды р. Неман не обладают. В данных пробах воды выживаемость тест-объекта была на уровне контроля.

Пробы воды р. Неман в хроническом эксперименте не токсичны по показателю выживаемость тест-объекта. В данных пробах наблюдалась незначительная гибель рачков (от 3,3 до 10,0 %).

Вымет молоди в анализируемых пробах воды р. Неман начался одновременно с выметом молоди в контроле. За время проведения хронического эксперимента в пробах наблюдалось незначительное превышение количества выметанной молоди по сравнению с контролем. Таким образом, пробы воды р. Неман не оказывали хроническое токсическое действие на плодовитость тест-объекта, так как суммарное количество выметанной молоди в опытной воде, за 21 сут. наблюдения достоверно не отличалось от соответствующих показателей в контроле.

При проведении токсикологических исследований, с использованием метода биотестирования, острой токсичности в пробах воды р. Неман не наблюдалось. Выживаемость и развитие рачков *Daphnia magna*, при экспозиции 4 сут., оставались на уровне контроля. В хроническом эксперименте (на протяжении 21-24 сут.) на ст. 1 выживаемость и плодовитость тест-объекта была на уровне контроля, а на ст. 2 была отмечена незначительная гибель тест-объекта, которая составила 10% по сравнению с контролем. В целом по результатам исследований биотестирования воды р. Неман не выявлено острого, а также и хронического токсического воздействия, данную среду обитания водных организмов можно охарактеризовать, как экологически безопасную.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В период с 2011 г. по настоящее время организована и функционирует система экологического мониторинга р. Неман, включая санитарно-гигиенические наблюдения в районе проектирования гидротехнических сооружений. Результаты исследований, проведенных на р. Неман, свидетельствуют о том, что данный водоток в настоящее время испытывает постоянную антропогенную нагрузку, связанную с диффузным стоком с водосбора реки и поступлением загрязняющих веществ от точечных источников – в основном, мелких и крупных населенных пунктов. В условиях перегруженности водотоков органическими и биогенными веществами сброс подогретых вод в период эксплуатации БтАЭС может оказать дополнительное влияние на биохимические процессы в водотоке, что, в свою очередь, может способствовать увеличению эвтрофирования водной экосистемы и снижению качества воды.

Расчет удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ) по результатам гидрохимических наблюдений показал, что в период с 2010 г. по 2016г. наблюдается возврат к отрицательной динамике индекса и общему тренду ухудшения статуса качества вод. Улучшение показателей качества вод р. Неман в 2015 г. может быть связано как с гидрологическими особенностями водного объекта (к примеру, высокой водности года) в 2015 г., так и с относительным уменьшением антропогенной нагрузки на водосбор реки.

Анализ и сравнение полученных результатов с гигиеническими критериями для открытых систем технического водоснабжения показывают, что воды р. Неман на протяжении большей части года не соответствуют гигиеническим критериям для открытых систем технического водоснабжения. Для получения воды с высокими органолептическими показателями и приемлемым уровнем риска по химическому и микробиологическому составу для оборотной системы водоснабжения строящейся БтАЭС необходимо применение комплекса методов очистки воды, доочистки и обеззараживания.

В то же время, пробы воды р. Неман в пределах Калининградской области следует считать не оказывающими токсического действия на водные организмы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безносков, В.Н. Особенности эвтрофирования водоема-охладителя АЭС [Текст] / В.Н. Безносков [и др.] // Актуальные проблемы экологии и природопользования. Сборник научных трудов Российского университета дружбы народов. Вып. 5. Ч. 2. Экологические исследования природно-техногенных систем. – Москва : Изд-во РУДН, 2004. – С. 176-186.
2. МУ 2.1.5.1183-03 «Санитарно-эпидемиологический надзор за использованием воды в системах технического водоснабжения промышленных предприятий» [Текст]. – Дата введения: 11.01.2003. – Москва : Стандартинформ, 2003. – 8 с.
3. Кулаков, Д.В. Зоопланктон и гидрохимические условия трансграничной реки Неман в период строительства Балтийской АЭС [Текст] / Д.В. Кулаков, Е.А. Верещагина, М.Е. Макушенко, Е.В. Лунева // Вода: химия и экология. – 2016. – № 6. – С. 46-55.
4. СП 151.13330.2012 «Инженерные изыскания для размещения, проектирования и строительства АЭС», часть 2 «Инженерные изыскания для разработки проектной и рабочей документации и сопровождения строительства» [Текст]. – Дата введения: 25.12.2012. – Москва : Стандартинформ, 2012. – 128 с.
5. ФР.1.39.2007.03222 Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости дафний [Текст]. – Москва : Стандартинформ, 2007. – 51 с.
6. ГОСТ 17.1.2.04-77 «Охрана природы. Гидросфера. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственный водных объектов» [Текст]. – Дата введения: 19.04.2010. – Москва : Стандартинформ, 2010. – 17 с.
7. РД 52.24.643-2002 «Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по

- гидрохимическим показателям» [Текст]. – Дата введения: 01.01.2004.– Москва : Стандартинформ, 2004. – 49 с.
8. Верещагина, Е.А. Методические основы комплексного мониторинга водных объектов зоны влияния АЭС для эффективной оценки качества воды [Текст] / Е.А. Верещагина, Е.В. Лунева, А.А. Шварц // Труды второй научно-практической конференции с международным участием, посвященной 70-летию атомной отрасли России «Экологическая безопасность АЭС». – Калининград, 20-21 октября 2015. – 43-49.
 9. Гусева, Т.В. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды [Текст] / Т.В. Гусева [и др.]. – Москва : Эколайн, 2000. – С. 87.
 10. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейнов реки Неман и рек бассейна Балтийского моря (русская часть в Калининградской обл.) [Текст]. – Москва : Стандартинформ, 2012. – 105 с.
 11. ПНД Ф Т 14.1:2.4.12-06 Методика определения токсичности водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов, питьевой, сточной и природной воды по смертности тест-объекта *Daphnia magna* Straus [Текст]. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 45 с.

REFERENCES

- [1] Beznosov V.N. et al. Osobennosti e`vtrofirovaniya vodoema-oxladitelya AE`S [Features of NPP Cooling Pond Eutrophication]. Aktual`ny`e problemy` e`kologii i prirodnopol`zovaniya. Sbornik nauchny`x trudov Rossijskogo universiteta druzhby` narodov [Actual Problems of Ecology and Landuse. Collection of Scientific Papers of RUDN University]. V. 5. P. 2. E`kologicheskie issledovaniya prirodno-texnogenny`x system [Ecological Researches of Environmental-Technogenic Systems]. Moskva: RUDN [Moscow: RUDN]. 2004. P. 176-186 (in Russian).
- [2] MU 2.1.5.1183-03 «Sanitarno-e`pidemiologicheskij nadzor za ispol`zovaniem vody` v sistemax texnicheskogo vodosnabzheniya promy`shlenny`x predpriyatij» [Methodical Recommendations 22.1.5.1183-03. Sanitary-Epidemiological Supervision on Water Usage in Industrial Enterprises Technical Water Supply]. Moskva: Standartinform. [Moscow: Standardinform]. Introduced 11.01.2003. 8 p. (in Russian).
- [3] Kulakov D.V., Vereshchagina E.A., Makushenko M.E., Luneva E.V. Zooplankton i gidroximicheskie usloviya transgranichnoj reki Neman v period stroitel`stva Baltijskoj AE`S [Zooplankton and Hydrochemical Parameters for Transboundary River Neman during the Construction Period of Baltic Nuclear Power Plant]. Voda: ximiya i e`kologiya [Water: Chemistry and Ecology]. 2016. N 6. P. 46-55 (in Russian).
- [4] SP 151.13330.2012 Inzhenerny`e izy`skaniya dlya razmeshheniya, proektirovaniya i stroitel`stva AE`S, chast` 2 Inzhenerny`e izy`skaniya dlya razrabotki proektnoj i rabochej dokumentacii i sprovovzhdeniya stroitel`stva [Code of Regulations 151.13330.2012. Engineering Surveys for the Location, Design and Construction of Nuclear Power Plants. Part 2. Engineering Surveys for the Development of Design and Working Documentation and Construction Support]. Moskva: Standartinform. [Moscow: Standardinform]. Introduced 25.12.2012. 2012. 128 p. (in Russian).
- [5] FR.1.39.2007.03222 Metodika opredeleniya toksichnosti vody` i vodny`x vy`tyazhek iz pochv, osadkov stochny`x vod, otxodov po smertnosti i izmeneniyu plodovitosti dafnij FR.1.39.2007.03222 [Methodology for Determining Water and Water Extracts from Soils, Sewage Sludge and Wastes Toxicity by Mortality and the Change in the Fertility of Daphnia]. Moskva: Standartinform. [Moscow: Standardinform]. 2007. 51 p. (in Russian).
- [6] RD 52.24.643-2002 Metod kompleksnoj ocenki stepeni zagryaznennosti poverxnostny`x vod po gidroximicheskim pokazatelyam [Statestandard 17.1.2.04-77. Protection of Nature. Hydrosphere. Indicators of the State and Taxation Rules of Fishery Water Bodies]. Moskva: Standartinform. [Moscow: Standardinform]. Introduced 07.01.78. 1977. 17 p. (in Russian).
- [7] RD 52.24.643-2002 «Metod kompleksnoj ocenki stepeni zagryaznennosti poverxnostny`x vod po gidroximicheskim pokazatelyam [Ruling Document 52.24.643-2002 Methodical Instructions. The Method of Integrated Assessment of the Contamination Degree of Surface Water by Hydrochemical Indicators]. Moskva: Standartinform. [Moscow: Standardinform]. Introduced 01.01.2004. 2004. 49 p. (in Russian).
- [8] Vereshchagina E.A., Luneva E.V., Shvartc A.A. Metodicheskie osnovy` kompleksnogo monitoringa vodny`x ob`ektov zony` vliyaniya AE`S dlya e`ffektivnoj ocenki kachestva vody` [Methodological Basics of Water Bodies Integrated Monitoring of NPP Influence Zones for Water Quality Effective Evaluation]. Trudy` vtoroj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodny`m uchastiem, posvyashhennoj 70-letiyu atomnoj otrasli Rossii «E`kologicheskaya bezopasnost` AE`S». – Kaliningrad, 20-21 oktyabrya 2015 [Proceedings of Second Scientific-Practical Conference with International Participation Dedicated to 70-years of Russian Nuclear Industry. Environmental Safety

- of Nuclear Power Plants. Kaliningrad. 20-21.10.2015]. P. 43-49 (in Russian).
- [9] Guseva T.V., Molchanova I.P., Zaika E.A., Vinichenko V.N., Averochkin E.M. Gidroximicheskie pokazateli sostoyaniya okruzhayushhej sredy [Hydrochemical Indicators of the Environment State]. Moskva: Ecoline [Moscow. Ecoline]. 2000. P. 87 (in Russian).
- [10] Sxema kompleksnogo ispol'zovaniya i ohrany` vodny`x ob`ektov bassejnov reki Neman i rek bassejna Baltijskogo morya (rossijskaya chast` v Kaliningradskoj obl.) [Scheme of Integrated Use and Protection of Water Bodies of the Neman River Basins and the Rivers of the Baltic Sea Basin (the Russian part in the Kaliningrad Region)]. Moskva: Standartinform. [Moscow: Standardinform]. 2012. 105 p. (in Russian).
- [11] PND F T 14.1:2:4.12-06 Metodika opredeleniya toksichnosti vodny`x vy`tyazhek iz pochv, osadkov stochny`x vod i otxodov, pit`evoj, stochnoj i prirodnoj vody` po smertnosti test-ob`ekta Daphnia magna Straus [Ruling Document 14.1:2:4.12-06 Methodology of Toxicity of Water Extracts of Soil, Sewage Sludge, Waste, Drinking and Natural Water Determining at the Test Object Daphnia Magna Straus Mortality]. Moskva: Standartinform. [Moscow: Standardinform]. 2011. 45 p. (in Russian).

Water Quality Assessment on Sanitary-Hygienic Parameters of Neman River at Baltic Power Plant (Under Construction) Region

E.V. Luneva^{*1}, E.A. Vereshchagina^{2}, D.V. Kulakov^{***3}, M.E. Makushenko^{***4}.**

**JSC «Concern Rosenergoatom», Projected passage № 4062, 6, bldg. 5, Moscow, Russia 115432*

¹ORCID iD: 0000-0003-4238-2214

Wos Researher ID: B-1754-2019

e-mail: luneva100@yandex.ru

***Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, Universitetskaya nab., 7/9. Saint-Petersburg, Russia, 199034*

²ORCID iD: 0000-0003-2249-4614

Wos Researher ID: G-8232-2015

e-mail: ea.grigorieva@gmail.com

³ORCID iD: 0000-0002-1855-4509

Wos Researher ID: G-9980-2018

e-mail: dvkulakov@mmail.ru

****St. Petersburg Division, Sergeev Institute of Environmental Geosciences, the Russian Academy of Sciences, Vasilievskiy island., Middle pr, 41, of. 519, Saint-Petersburg, Russia 199004*

⁴ORCID iD: 0000-0003-0071-8314

Wos Researher ID: B-2512-2019

e-mail: maria@hgepro.ru

Abstract – Using surface water objects for water supply and disposal systems of nuclear power plants (NPP) produces a complex of problems concerned with environmental and health protection. Sanitary-hygienic (including hydrochemical and micro-biological) parameters and natural water toxicity are studied at Neman river, as the river is planned to be a cooling pond of Baltic NPP, which is under construction. Water quality assessment is done based on the observed data during 2011–2016.

Observations have shown high variety of river condition during the year (seasonal variations) with not good enough water quality parameters for water supply purposes over the most part of the year. To obtain water with high organoleptic indicators and an acceptable level of risk in terms of chemical and microbiological composition for water supply system, a complex of methods for water purification, post-treatment and disinfection should be applied.

Although, it is shown, that natural waters of the Neman river within the Kaliningrad region should be considered not to have a toxic effect on aquatic organisms.

Keywords: water quality assessment, micro-biological parameters, hydrochemical parameters, Neman river, Baltic nuclear power plant.

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 624.04.45.001.3

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОГО СОСТОЯНИЯ ЗАЩИТНЫХ
ОБОЛОЧЕК АЭС НА ЭТАПЕ СООРУЖЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ**

**© 2019 В.Н. Медведев, Александр С. Киселев, Алексей С. Киселев,
В.Ф. Стрижов, А.Н. Ульянов, М.И. Скорикова**

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

В ИБРАЭ РАН разработана экспертная система оценки напряжённо-деформированного состояния (НДС) защитных оболочек блоков АЭС с ВВЭР-1000. Экспертная система состоит из программного комплекса CONT, датчиков контроля усилий в армоканатах, датчиков контрольно-измерительной аппаратуры. В работе приводится описание экспертной системы оценки НДС защитных оболочек АЭС и особенности её применения.

Ключевые слова: *защитная оболочка, напряженно-деформированное состояние, экспертная система.*

Поступила в редакцию 08.11.2018
После доработки 22.02.2019
Принята к публикации 25.02.2019

Введение

Контроль напряженно-деформированного состояния (НДС) в период строительства и эксплуатации выполняется с помощью комплексной системы контроля защитной оболочки, которой по проекту оснащаются все защитные оболочки РО энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 в период ее возведения.

Для регулярного измерения усилий на тяжких анкерах арматурных канатов часть анкерных узлов оборудована датчиками силы НВ005 (ПСИ-01), дающими возможность измерения усилий в арматурных канатах в процессе преднапряжения оболочки, приемо-сдаточных испытаний и периода эксплуатации энергоблока АЭС.

ИБРАЭ РАН на протяжении длительного времени выполняет работы, связанные с расчетами напряженно-деформированного состояния защитных оболочек АЭС с целью повышения их эксплуатационных качеств. Для выполнения расчетов защитных оболочек АЭС различной геометрии в трехмерной и осесимметричной постановках разработан программный комплекс «CONT», который аттестован в Ростехнадзоре.

Наличие указанных факторов позволило разработать экспертную систему оценки НДС защитных оболочек АЭС с ВВЭР-1000.

**1 Разработка экспертной системы оценки напряженного состояния
защитных оболочек АЭС**

В ИБРАЭ РАН по заказу АО «Концерн Росэнергоатом» разработана «Экспертная система оценки напряжённо-деформированного состояния (НДС) защитных оболочек блоков АЭС с ВВЭР-1000». Экспертная система создана на базе программного

комплекса CONT, разработанного в ИБРАЭ РАН для анализа НДС строительных конструкций при различных видах нагрузок. ПК CONT аттестован в Ростехнадзоре, регистрационный номер паспорта 347, дата выдачи – 21.11.2013 г. В ПК реализованы эффективные численные методы конечных элементов и суперэлементов, а также параллельные методы обработки потоков данных, позволяющие проводить нелинейные расчеты для моделей, содержащих десятки миллионов степеней свободы.

Экспертная система включает:

- данные конечноэлементной модели 3О;
- программный комплекс CONT;
- базу данных показаний датчиков контроля усилий в армоканатах (НВ005, ПСИ-01);
- базу данных показаний датчиков контрольно-измерительной аппаратуры, установленных в теле оболочки.

Экспертная система внедрена на энергоблоке №1 Калининской АЭС, энергоблоках №1, 2, 3 и 4 Ростовской АЭС [1].

Для того чтобы выполнить оценку достаточности уровня обжатия защитной оболочки, обеспечивающий работоспособность конструкции при проектной аварии, необходимо выполнить расчеты НДС оболочки от действия преднапряжения с учетом прогнозируемых значений усилий в арматурных канатах на момент проведения последующих КПП с учетом потерь на анкеровку по показаниям датчиков ПСИ-01, собственного веса, изменяющегося во времени температурного градиента из-за перепада температур внутри и снаружи оболочки при аварии (рис. 1а), внутреннего аварийного давления, длительной температурной нагрузки от воздействия эксплуатационного поля температуры, сейсмической нагрузки. При расчете НДС, вызванного воздействием преднапряжения, автоматически определяется коэффициент увеличения обжатия вследствие деформации оболочки при нагружении ее внутренним аварийным давлением. Компоненты НДС 3О для всех нагрузок кроме преднапряжения рассчитываются на предварительном этапе адаптации экспертной системы к конкретному блоку АЭС и хранятся в базе данных на диске компьютера.

Суммируя вклады от отдельных факторов нагружения, вычисляются компоненты окружных и меридиональных усилий и изгибающих моментов в стенке оболочки в заданные моменты времени (рис. 1б).

Результаты расчета НДС защитной оболочки выводятся в протокол в виде эпюр напряжений, сил и моментов, запасов прочности по СНиП [2] в заданных сечениях модели 3О для условий аварии с учетом всех факторов нагружения в заданные моменты времени с момента начала аварии (рис. 1в).

По полученным значениям усилий и изгибающих моментов в сечениях защитной оболочки можно судить о наличии в стенке оболочки зон с пониженным уровнем обжатия, для которых необходимо выполнить анализ прочности, а также положение этих зон и номера проходящих через них арматурных канатов.

Если критерии прочности железобетонного сечения в зонах пониженного обжатия не выполняются, можно оценить необходимый уровень усилий в канатах СПЗО для корректировки НДС 3О в зонах пониженного обжатия за счет пошагового увеличения усилий в канатах СПЗО, проходящих вблизи выявленных зон, и проведения вариантных расчетных оценок по описанной выше схеме, пока критерии прочности не будут выполняться. Такой подход позволяет провести предварительную оценку необходимого объема работ по корректировке усилий в канатах, а именно, определять минимальное количество канатов и уровень усилий в них для исключения зон оболочки с пониженным уровнем обжатия.

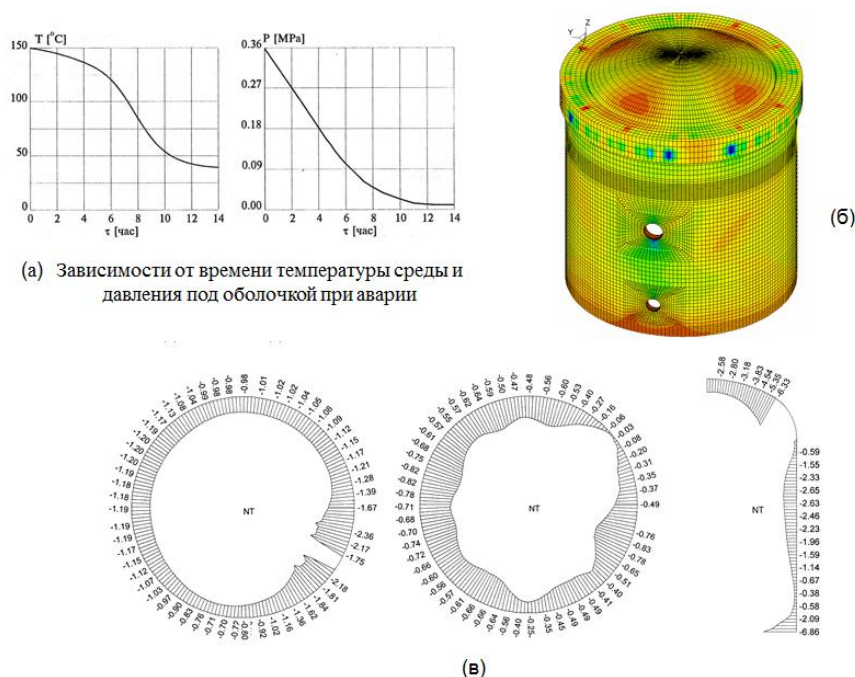


Рисунок 1 – Изменение давления и температуры среды под оболочкой при аварии (а), распределение напряжений по объему ЗО в результате воздействия аварийных и эксплуатационных нагрузок (б), эпюры усилий в стенке оболочки (в) [The change in pressure and temperature of the medium under the containment during an accident (a), the distribution of stresses over the volume of the aura as a result of the impact of emergency (b) and operational loads (c)]

В качестве примера на рисунке 2 показана схема развертки цилиндрической части ЗО при наличии зоны пониженного обжатия из-за обрыва 4-х канатов СПЗО. В зоне их пересечения появляется такая зона. Данная информация, а также номера канатов СПЗО проходящих через зону пониженного обжатия в табличном виде выводится в протокол расчета, автоматически формирующийся по результатам работы экспертной системы, если критерии прочности не выполняются.

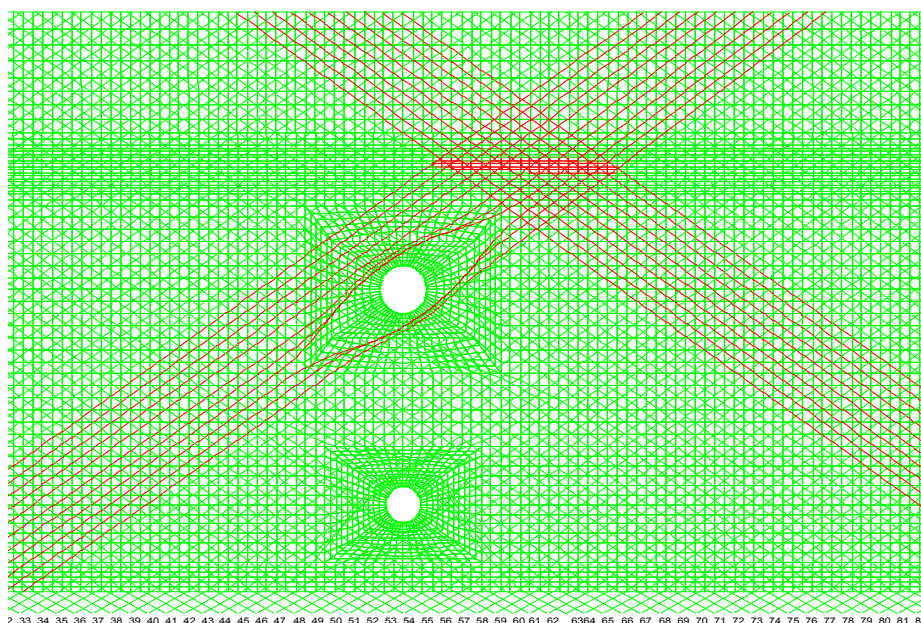


Рисунок 2 – Фрагмент развертки цилиндра модели ЗО с демонстрацией зоны пониженного обжатия [Fragment of the cylinder scan of the containment model with demonstration of reduced compression zone]

Таким образом, экспертная система позволяет:

- выполнить оценку НДС защитной оболочки в процессе преднапряжения, прямо-сдаточных испытаний и эксплуатации с учетом нагрузок при проектной аварии;
- выполнить анализ достаточности обжата оболочки и определять объем работ по корректировке усилий в арматурных канатах в период проведения контрольно-профилактических работ на системе предварительного напряжения;
- исключить необоснованные подтяжки арматурных канатов при проведении КПП, которые отрицательно сказываются на состоянии этих канатов, а также бетона и металлической облицовки сооружения;
- обосновать эксплуатационную пригодность защитной оболочки при нарушении нормальной работы элементов СПЗО, например, при обрыве одного или нескольких арматурных канатов.

Экспертная система может быть использована для обоснования соответствия оболочки требованиям нормативных документов по безопасности.

Исходными данными, которые формируются на этапе адаптации экспертной системы к расчетам конкретной защитной оболочки и не могут варьироваться пользователем, являются:

- геометрия защитной оболочки;
- конечноэлементное разбиение объема защитной оболочки;
- Геометрия трассировки канатов СПЗО;
- физико-механические свойства материалов защитной оболочки;
- суперэлементное представление базовой конечноэлементной модели;
- описание поверхностей модели оболочки и граничных условий.

Исходными данными, которые могут варьироваться пользователем экспертной системы при анализе работы защитной оболочки, являются:

- усилия в арматурных канатах;
- координаты расположения датчиков КИА;
- азимутальные и осевые координаты сечений, для которых строятся эпюры напряжений и усилий в стенке ЗО;
- величина давления под оболочкой при аварии;
- коэффициент трения канатов СПЗО в каналообразователях;
- потери в % усилий канатов СПЗО при анкеровке;
- диаграмма работы каната СПЗО в виде билинейной функции, имеющей линейный упругий участок и участок пластической деформации с упрочнением;
- теплофизические свойства материалов защитной оболочки;
- пороговый уровень чувствительности датчиков напряжений КИА;
- значение порогового уровня компонентов усилий в стенке оболочки;
- уровень аварийного давления и коэффициентов самонатяжения канатов СПЗО для заданных моментов времени;
- параметры оценки прочности (коэффициенты учета нагрузок в соответствии с нормативными документами).

Следует отметить, что применение детальной конечноэлементной модели ЗО, данных измерений усилий на анкерах арматурных канатов, а также компьютерных методов обработки больших объемов информации о распределении компонентов напряженного состояния для расчета усилий и моментов в стенке защитной оболочки повышает достоверность расчетных оценок, поскольку рассматривается более 15000 сечений стенки ЗО, охватывающих весь объем ЗО, включая зоны концентрации напряжений вблизи вута, опорного кольца, зоны в окрестности крупных технологических проходов.

2 Применение экспертной системы оценки НДС защитной оболочки на энергоблоке №3 Ростовской АЭС

Для адаптации экспертной системы для энергоблока №3 Ростовской АЭС использована документация, полученная при выполнении работ по мониторингу в период возведения, преднапряжения и приемо-сдаточных испытаний защитной оболочки и включенная в информационную систему мониторинга защитной оболочки [3-5].

2.1 Расчетная модель защитной оболочки

Для анализа кинетики НДС защитной оболочки 3-го блока РоАЭС с учетом ползучести бетона, разработана детальная конечноэлементная модель сооружения (рис. 3а) с использованием 8-ми узловых объемных конечных элементов, в которой с помощью стержневых конечных элементов непосредственно моделируется меридиональная и окружная арматура вблизи наружной и внутренней поверхности 3О (число узлов – 966680, число конечных элементов – 1284628).

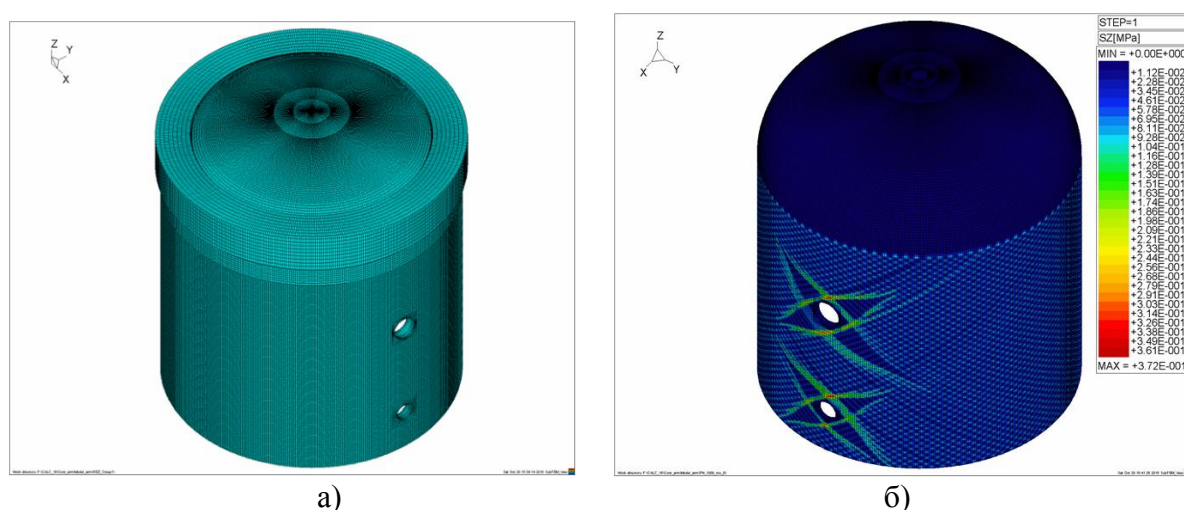


Рисунок 3 – Конечноэлементная модель защитной оболочки энергоблока №3 Ростовской АЭС (а) и распределение давления на срединной поверхности оболочки (б), моделирующего воздействие канатов системы СПЗО [The finite element model of the Rostov NPP power unit No. 3 containment (a) and the pressure distribution on the middle containment surface (b), simulating the effect of containment system ropes]

Нагрузка от преднапряжения представлена в виде неравномерно распределенного давления на срединную поверхность модели оболочки, вычисляемого в соответствии с геометрией каждого каната и величины усилия его натяжения с учетом потерь на трение и анкеровку [6]. На рисунке 3б показана картина распределения давления, которое моделирует нагрузку от преднапряжения, на срединной поверхности модели оболочки на цилиндре [7]. Видно, что в зонах пересечения канатов противоположных направлений имеют место локальные максимумы нагрузки, кроме этого дополнительные усилия возникают в зонах обхода отверстий.

На этапе эксплуатации энергоблока №3 Ростовской АЭС для оценки уровня потерь усилий в арматурных канатах системы СПЗО-М из-за изменения геометрии оболочки вследствие процесса ползучести бетона оболочки выполнено моделирование процесса деформирования оболочки с учетом действующих нагрузок и характеристик ползучести бетона. Это позволило расчетным путем определить прогнозируемые усилия в арматурных канатах во время следующего ППР. Потери усилий в арматурных канатах возникают из-за уменьшения радиуса 3О вследствие процессов ползучести бетона, что приводит к уменьшению длины предварительно натянутого каната, снижению его продольной деформации. В результате ползучести бетона происходит перераспределение напряжений

в бетоне и арматуре. Величины напряжений в арматуре измеряются датчиками КИА и увеличиваются по сравнению с исходным состоянием непосредственно после преднапряжения. На рисунке 4а показаны графики изменения напряжений в меридиональной арматуре во времени на отметке 32.6 м., полученные в расчетах.

Эти данные хорошо соответствуют данным измерений, что свидетельствует о корректности результатов расчетов. На рисунке 4б показан график изменения потерь усилий в канатах цилиндра во времени (номера шага расчета), рассчитанных по перемещениям узлов конечноэлементной модели на каждом шаге моделирования.

Применение экспертной системы оценки НДС защитной оболочки на этапе преднапряжения и приемо-сдаточных испытаний энергоблоков № 3 и № 4 Ростовской АЭС способствовало своевременному пуску энергоблока.

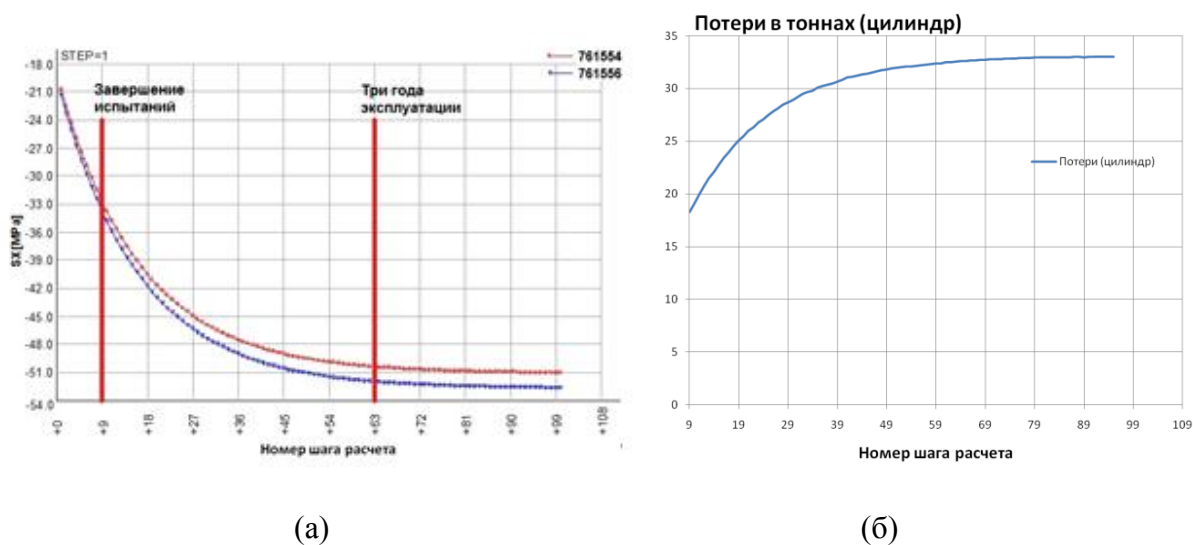


Рисунок 4 – Зависимость напряжений в меридиональной арматуре от времени (1 шаг = 20 сут.) на отметке 32.6 м. (а); средние потери усилий в канатах цилиндра из-за ползучести бетона (б)
[Dependence of stresses in the meridional reinforcement from time (1 step = 20 days) at 32.6 m. (a); average effort losses in the cylinder ropes due to concrete plastic flow deformation (b)]

2.2 Формирование базы данных по показаниям датчиков КИА

При разработке экспертной системы формируется база данных по показаниям датчиков КИА, для графического представления которых разработаны необходимые алгоритмы и программные модули. В этих модулях предусмотрен формат временной шкалы, который позволяет анализировать показания датчиков КИА как в конкретный период работы оболочки, так и в период длительной эксплуатации. В качестве примера на рисунке 5 приведены приращения напряжений в меридиональной стержневой арматуре и значения температуры в бетоне с момента окончания приемо-сдаточных испытаний защитной оболочки (11.09.2014) по 10.08.2018.

Такие возможности представления информации позволяют не только оценивать напряженно-деформированное состояние защитной оболочки в конкретный период, но и определять реологические характеристики железобетонной конструкции. Кроме того, представляется возможным определять работоспособность самих датчиков.

На рисунке 6 представлены результаты измерений перемещений стенки и температуры в бетоне с момента окончания приемо-сдаточных испытаний защитной оболочки (11.09.2014) по 10.08.2018.

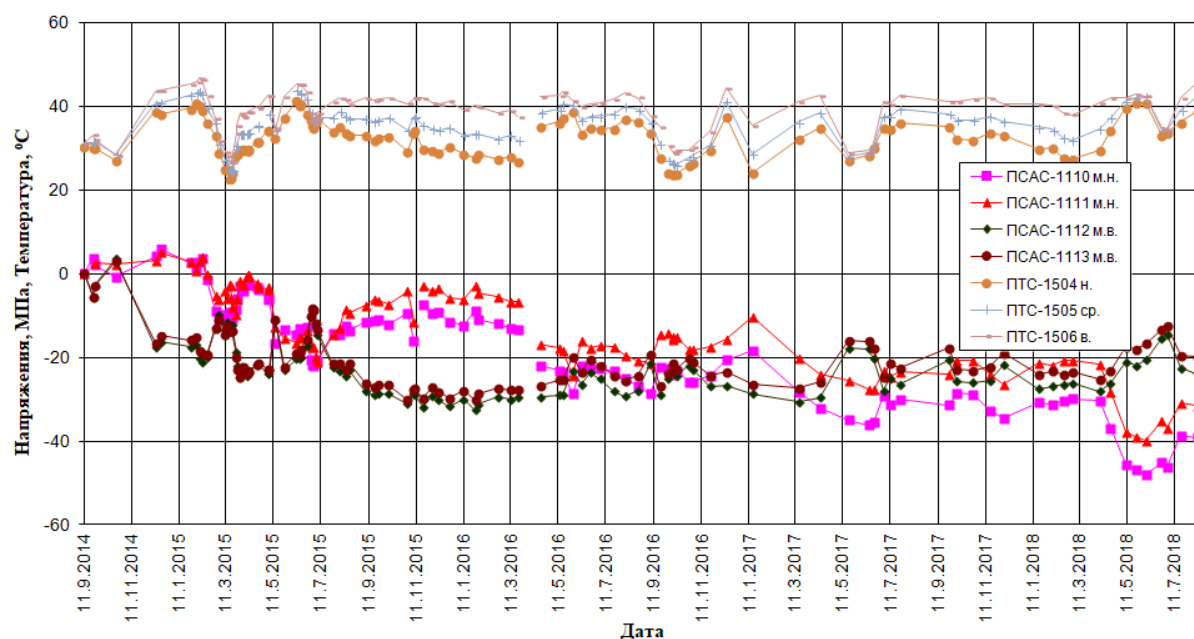


Рисунок 5 – Приращение напряжений в меридиональной стержневой арматуре и значения температуры в бетоне с момента окончания приемо-сдаточных испытаний защитной оболочки (11.09.2014) по 10.08.2018 г. 3-й блок РоАЭС, створ №1, отметка 32,6 м [Increment of stresses in the meridional rod reinforcement and temperature values in concrete since the end of acceptance tests of the containment (11.09.2014) on 10.08.2018 Rostov NNP 3rd unit, section №1, 32.6 m elevation]

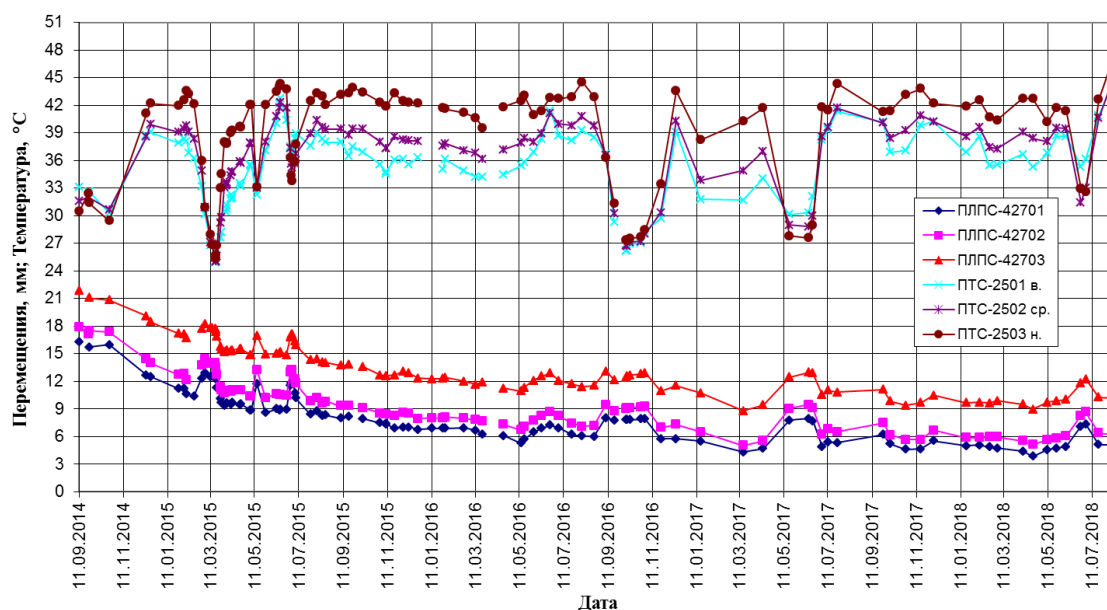


Рисунок 6 – Результаты измерений перемещений стенки и температуры в бетоне с момента окончания приемо-сдаточных испытаний защитной оболочки (11.09.2014) по 10.08.2018. 3-й блок РоАЭС, створ №2 [The results of measurements of wall movement and temperature in concrete from the moment of completion of acceptance tests of the containment (11.09.2014) to 10.08.2018. Rostov NPP 3rd unit, section №2]

2.3 Формирование базы данных по показаниям датчиков силы ПСИ-01

Для оценки НДС защитной оболочки во времени в первую очередь необходимо следить за динамикой изменения усилий в арматурных канатах по результатам натурных измерений датчиками силы ПСИ-01, так как это наиболее надежный на

сегодняшний день показатель состояния системы преднапряжения.

Анализ результатов измерений, полученных при помощи датчиков силы ПСИ-01 на тяжных анкерах арматурных канатов цилиндра защитной оболочки показал, что все приборы работали стабильно, реагировали на колебания сезонных температур. За рассматриваемый период с 11.09.2014 по 10.08.2018 года произошло незначительное снижение усилий – с 822 тс до 810,5 тс, т.е. снижение составило 11,5 тс или 1,4 %.

2.4 Применение экспертной системы в период испытания защитной оболочки

В период с 02.07.2018 по 06.07.2018 года была испытана на герметичность защитная оболочка энергоблока №3 Ростовской АЭС. Испытания проводились путем создания разряжения в герметичном объеме $0,03 \div 0,05$ кгс/см² и избыточного давления 1,4 кгс/см² с дополнительным измерением утечки на промежуточных ступенях.

Характер приращений напряжений в стержневой арматуре и деформаций в бетоне в период испытаний защитной оболочки на герметичность показал, что конструкция работает в упругой стадии, т.к. после снятия нагрузки показания приборов возвращаются в исходное состояние (рис. 7). Это позволяет утверждать, что защитная оболочка удовлетворяет проектным критериям оценки НДС в период испытаний.

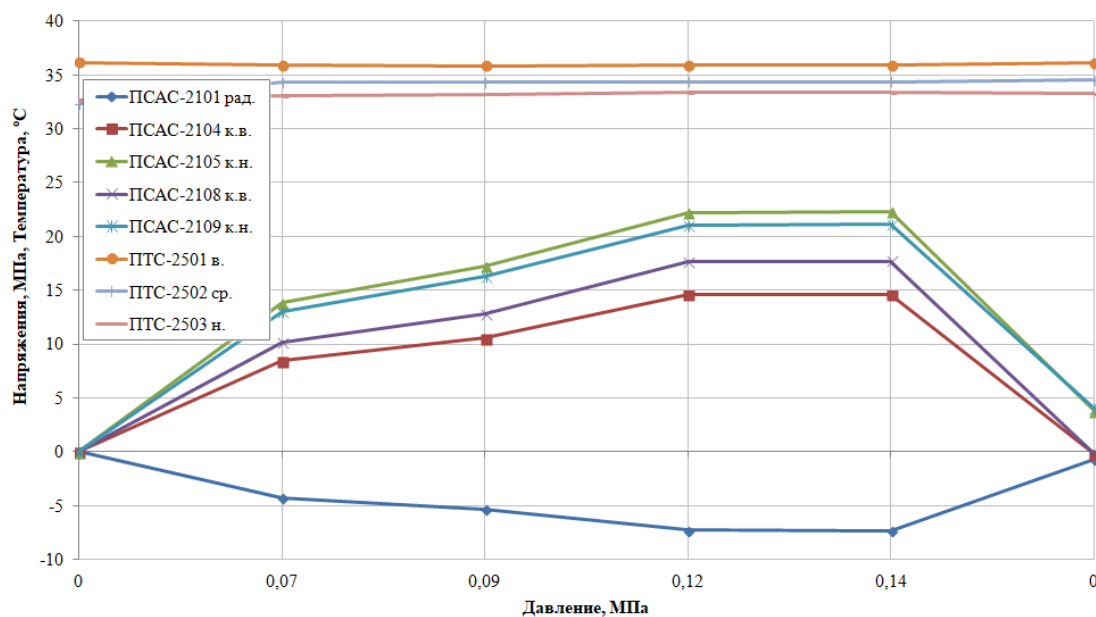


Рисунок 7 – Приращение напряжений в кольцевой стержневой арматуре и измерения температуры в бетоне при испытании защитной оболочки на герметичность, 3-й блок РоАЭС, створ №2, отметка 32,6 м.
[The results of measurements of wall movement and temperature in concrete from the completion moment of acceptance tests of the containment (11.09.2014) to 10.08.2018. Rostov NPP 3rd unit , section № 2]

Расчетная оценка НДС защитной оболочки энергоблока №3 Ростовской АЭС, выполненная с помощью экспертной системы после испытания на герметичность системы герметичного ограждения на основе результатов контроля системы СПЗО-М и показаний КИА АСК НДС и СКУ, показала, что уровень преднапряжения достаточен для восприятия защитной оболочкой всех предусмотренных проектом нагрузок и воздействий [8, 9].

3 Применение экспертной системы оценки НДС защитной оболочки АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ

Экспертная система может быть адаптирована для оценки НДС и обеспечения эксплуатационной пригодности защитных оболочек блоков АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ с учетом всех конструктивных особенностей защитных оболочек (геометрии, армирования, распределения усилий в канатах системы предварительного напряжения, полного спектра нагрузок, включая аварийные и сейсмические).

На рисунке 8а и б показаны распределения кольцевых и меридиональных напряжений по объему модели оболочки АЭС-2006 с учетом воздействия эксплуатационных и аварийных нагрузок. Расчеты НДС защитной оболочки выполнены для случая воздействия нагрузок в момент начала аварии, включающей собственный вес, преднапряжение, внутреннее давление и температурную нагрузку, которая соответствует начальному стационарному распределению температуры.

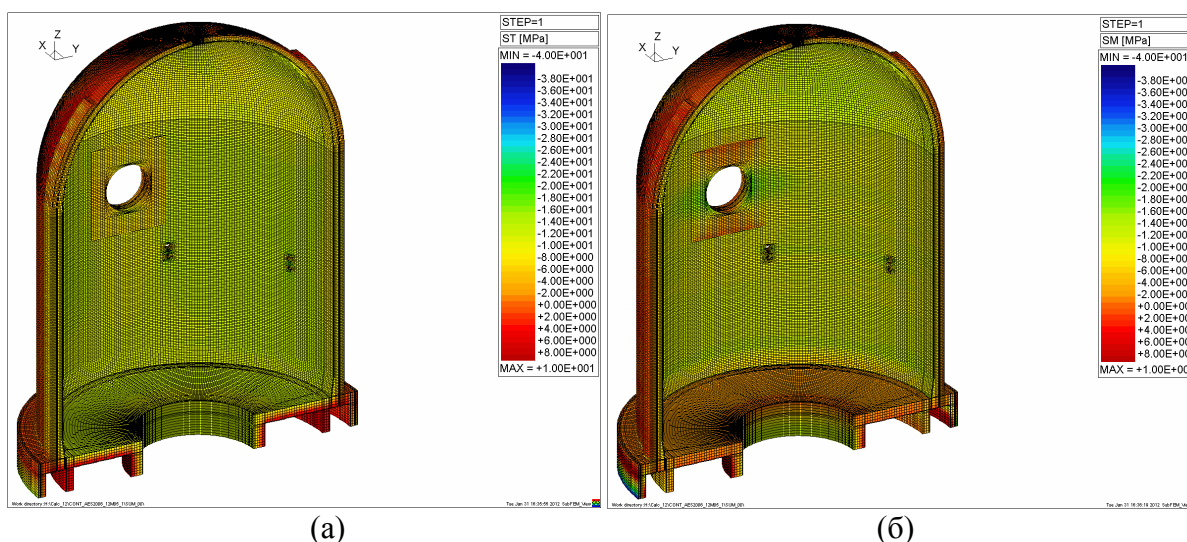


Рисунок 8 – Распределение кольцевых (а) и меридиональных (б) напряжений в бетоне от воздействия суммарной аварийной нагрузки в момент начала аварии [Distribution of ring (a) and meridional (b) stresses in concrete from the impact of the total emergency load at the time of the accident]

Наиболее напряженными зонами защитной оболочки АЭС-2006 являются:

- узел сопряжения цилиндрической части оболочки с основанием,
- зона в окрестности крупной технологической проходки,
- зоны расположения пилостр на цилиндрической части,
- зоны купола в области пересечения армоканатов в трех направлениях и зоны концов пилостр.

Разработанная конечноэлементная модель 3О позволяет в рамках экспертной системы проводить оценку достаточности обжатия 3О проекта АЭС-2006 аналогично тому, как это делается для 3О ВВЭР-1000.

4 Оценка НДС защитной оболочки АЭС по показаниям ПДИ

В настоящее время экспертная система дорабатывается с целью возможности дополнительно оценивать НДС защитной оболочки по показаниям датчиков ПДИ, предназначенных для измерения деформаций в консолях полярного крана.

Особо следует отметить, что кран кругового действия – это технологическое

оборудование, которое выполняет сопровождение основных механомонтажных работ на стадии строительства и в период планово-предупредительных ремонтов при эксплуатации. Кроме того, выполняет работы по загрузке свежего и выгрузке отработанного топлива.

Физические принципы работы защитной оболочки заключаются в том, что после монтажа крана кругового действия на подкрановый путь в районе ходовых колес воздействует сила, обусловленная его собственным весом и весом оборудования (корпус реакторной установки, парогенераторы и т.д.), устанавливаемого с помощью крана. Стена защитной оболочки в зоне крепления консоли воспринимает момент силы, который вызывает деформации сооружения [10, 11].

На данном этапе работы изучен вопрос о возникновении эллиптичности и трещинообразования стенки защитной оболочки АЭС при воздействии нагрузок от работающего полярного крана при монтаже оборудования (корпус реакторной установки, парогенераторы и т.д.) в период возведения сооружения. Разработаны методика и расчетная модель (рис. 9), позволяющие выполнить анализ НДС защитной оболочки с учетом нагрузок от работы полярного крана при монтаже оборудования.

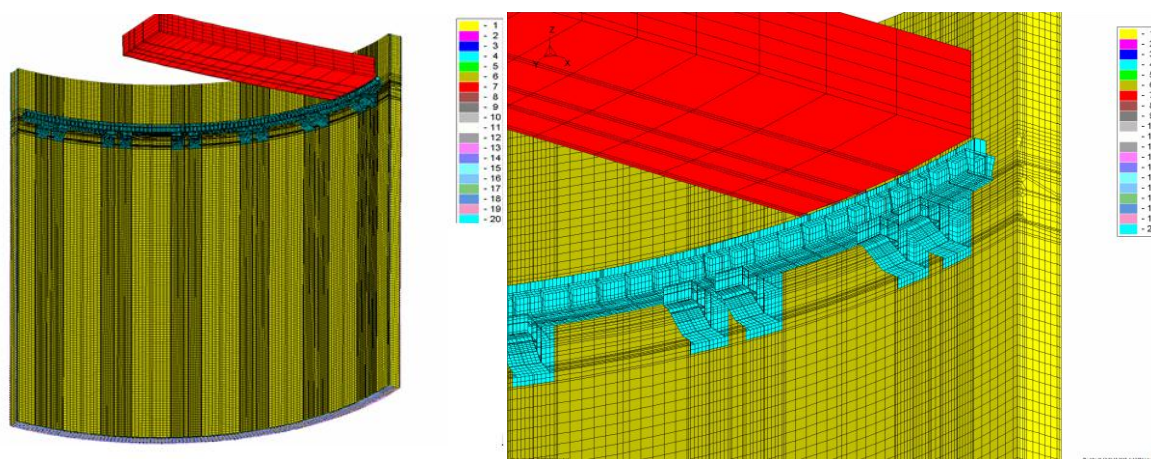


Рисунок 9 – Расчетная модель одной четвертой части ЗО с полярным краном и ее увеличенный фрагмент (номера материалов: 1 – бетон, 4 – сталь покрывной балки и консолей, 6 – стальная облицовка, 7 – кран, 8 – колеса крана, 12-20 – арматура) [Calculated model of one fourth of the containment with a polar crane and its enlarged fragment (material numbers: 1 – concrete, 4 – steel of the girder beam and consoles, 6 – steel lining, 7 – crane, 8 – crane wheels, 12-20 – reinforcement)]

В результате выполненного расчетного анализа получены данные о распределении перемещений узлов модели (рис. 10а) и компонентов НДС (рис. 10б) при нагружении подкрановой консоли весом крана после монтажа.

Можно отметить, что в зоне подкрановых консолей, ближайших к опорным конструкциям крана имеет место характерное выпучивание стенки оболочки. Это связано с совместным деформированием крана, подкрановых путей и стенки оболочки. Величина перемещений составляет порядка 2,04 мм, что на диаметре защитной оболочки дает увеличение диаметра на 4,08 мм. Это значение достаточно хорошо соответствует результатам измерений при повороте крана на 90^0 после монтажа, где увеличение диаметра вдоль оси крана составило 4,66 мм.

Основной причиной появления растягивающих напряжений на внешней поверхности защитной оболочки в зоне подкрановых консолей является совместное деформирование крана (прогиб), подкрановых конструкций и стенки оболочки. Под действием веса крана (и поднимаемого груза) подкрановая консоль прогибается вниз. При этом головка рельса из-за поворота сечения стремится переместиться к оси

оболочки. Однако опорные конструкции крана не позволяют ей такого смещения и кран, и подкрановые конструкции совместно распирают оболочку наружу.

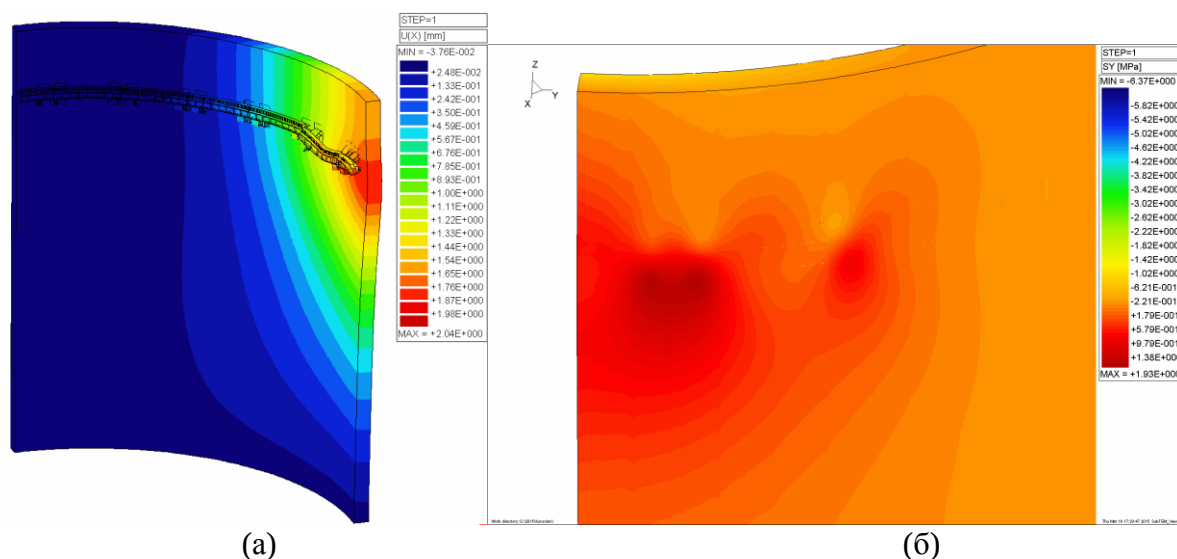


Рисунок 10 – Перемещения стенки оболочки и подкрановых конструкций в направлении оси крана (перемещения показаны в масштабе для наглядного отображения деформаций) – (а) и распределение окружных напряжений в бетоне стенки оболочки при воздействии собственного веса полярного крана (вид снаружи оболочки) – (б) [Displacement of the containment wall and crane structures in the direction of the crane axis (displacements are shown on the scale for visual display of deformations) – (a) and the distribution of circumferential stresses in the concrete of the containment wall when exposed to its own weight of the polar crane (outside view of the containment) – (b)]

Анализ полученных результатов показал, что при воздействии на цилиндрическую часть оболочки веса полярного крана в результате выпучивания наружу стенки защитной оболочки в зоне установки подкрановых консолей, расположенных вдоль оси крана, на внешней поверхности бетонной стенки оболочки возникают растягивающие окружные напряжения 1,9 МПа. Меридиональные напряжения достигают 1,58 МПа. Зона растягивающих меридиональных напряжений менее протяженна, чем зона растягивающих окружных напряжений. Полученный уровень растягивающих окружных напряжений близок к пределу прочности бетона на растяжение и, следовательно, в зонах расположения подкрановых консолей на внешней стороне защитной оболочки могут образовываться меридиональные трещины незначительной глубины. Напряжения в указанных областях могут быть и выше значений, полученных из расчета, с учетом отклонений рельсового пути крана от идеальной окружности. Особенно негативны случаи уменьшения диаметра подкрановых путей, т.к. усилие распора подкрановых путей и стенки оболочки в результате совместного деформирования с краном в этом случае должно возрастать.

Выводы

1. Экспертная система позволяет формировать базу данных по показаниям датчиков КИА и датчиков силы ПСИ-01 для расчетов напряженно-деформированного состояния защитной оболочки, графическое представление данных позволяет оценивать работоспособность самих датчиков.
2. Экспертная система позволяет исключать необоснованные подтяжки арматурных канатов при проведении КПР, которые отрицательно сказываются на состоянии этих канатов, а также бетона и металлической облицовки сооружения.
3. В случае самопроизвольного обрыва одного или нескольких арматурных

канатов в процессе эксплуатации защитной оболочки экспертная система определяет достаточность уровня обжатия конструкции для восприятия аварийной нагрузки или указывает на необходимость принятия срочных мер по восстановлению ее эксплуатационной пригодности: подтяжка арматурных канатов, проходящих вблизи оборванных канатов, или срочная замена оборванных канатов.

4. В период с 02.07.2018 по 06.07.2018 года на энергоблоке №3 Ростовской АЭС была испытана на герметичность система герметичного ограждения. Испытания проводились путем создания разряжения в герметичном объеме $0,03 \div 0,05$ кгс/см² и избыточного давления 1,4 кгс/см² с дополнительным измерением утечки на промежуточных ступенях.

Характер приращений напряжений в стержневой арматуре и деформаций в бетоне в период испытаний защитной оболочки на герметичность показал, что конструкция работает в упругой стадии, т.к. после снятия нагрузки показания приборов возвращаются в исходное состояние. Это позволяет утверждать, что защитная оболочка удовлетворяет проектным критериям оценки НДС в период испытаний.

5. Экспертная система использовалась для оперативной оценки эксплуатационной безопасности защитной оболочки энергоблоков № 3 и 4 Ростовской АЭС в период испытаний на герметичность в соответствии с требованиями нормативных документов по безопасности.

6. Применение разработанной экспертной системы для прогноза и анализа НДС 30 действующих блоков АЭС (в перспективе и для защитных оболочек АЭС нового поколения – АЭС 2006, ВВЭР-ТОИ) является эффективным инструментом подтверждения выполнения требований по эксплуатационной пригодности защитных оболочек.

7. В процессе возведения на конструкцию оболочки действуют нагрузки от веса полярного крана, полная масса которого с учетом подкранового рельса составляет 650 тонн. В этой связи рекомендуется устанавливать ПДИ в проектное положение до монтажа полярного крана

8. В настоящее время экспертная система дорабатывается с целью возможности дополнительно оценивать НДС защитной оболочки по показаниям датчиков ПДИ, предназначенных для измерения деформаций в консолях полярного крана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Медведев, В.Н.* Разработка экспертной системы оценки напряженного состояния для защитной оболочки 1-го энергоблока Волгодонской АЭС [Текст] / В.Н. Медведев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2008. – Спецвыпуск – С. 107-112.
2. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения [Текст]. – Москва, 2004.
3. РД ЭО 1.1.2.99.0624-2011. Мониторинг строительных конструкций атомных станций [Текст]. – Москва, 2011.
4. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния [Текст]. – Москва, 2011.
5. НП-010-16. Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций [Текст]. – Москва, 2016.
6. Патент на изобретение RUS 2548267. Способ натяжения арматурных канатов [Текст] / Л.А. Большов, В.Н. Медведев, В.Ф. Стрижов, А.Н. Ульянов. – 20.04.2015.
7. *Медведев, В.Н.* Натурные наблюдения на этапе строительства защитной оболочки энергоблока № 3 Ростовской АЭС [Текст] / В.Н. Медведев [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2014. – № 3 (12). – С. 89-99.
8. *Медведев, В.Н.* Результаты испытаний защитной оболочки энергоблока № 3 Ростовской АЭС [Текст] / В.Н. Медведев [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – № 2 (15). – С. 71-83.

9. Сальников, А.А. Особенности НДС защитных оболочек АЭС на этапе возведения, преднапряжения, прямо-сдаточных испытаний и эксплуатации [Текст] / А.А. Сальников [и др.] // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики: материалы 11-й междунар. научно-технич. конф. Москва, 23-24 мая 2018 г. – Москва : Концерн Росэнергоатом, 2018. – С. 24-30.
10. Пимшин, Ю.И. Влияние крана кругового действия на техническое состояние строящейся защитной герметичной оболочки АЭС [Текст] / Ю.И. Пимшин [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 2 (19). – С. 33-42.
11. Пимшин, Ю.И. Оценка напряженно-деформированного состояния защитных герметичных оболочек на примере блоков Ростовской АЭС [Текст] / Ю.И. Пимшин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017. – № 3. – С. 36-42.

REFERENCES

- [1] Medvedev V.N., Ulyanov A.N., Kiselev Al-Ndr S., Kiselev Alexey S., Strizhov V.F., Bayuklin V.F. Razrabotka e`kspertnoj sistemy` ocenki napryazhennogo sostoyaniya dlya zashhitnoj obolochki 1-go e`nergobloka Volgodonskoj AE`S [Development of Expert System for Assessing the Stress State for the Volgodonsk NPP1st Unit Containment]. Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Texnicheskie nauki [News of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Science]. 2008. Special issue. P. 107-112 (in Russian).
- [2] SNiP 52-01-2003. Betonny`e i zhelezobetonny`e konstrukcii. Osnovny`e polozheniya [SNiP 52-01-2003. Concrete and Reinforced Concrete Structures. The Main Provisions]. Moskva [Moscow]. 2004 (in Russian).
- [3] RD E`O 1.1.2.99.0624-2011. Monitoring stroitel`ny`x konstrukcij atomny`x stancij [RD EO 1.1.2.99.0624-2011. Monitoring of Building Structures of Nuclear Power Plants]. Moskva [Moscow]. 2011 (in Russian).
- [4] GOST 31937-2011. Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoringa texnicheskogo sostoyaniya [GOST 31937-2011. Buildings and Constructions. Rules of Inspection and Monitoring of Technical Condition]. Moskva [Moscow]. 2011 (in Russian).
- [5] NP-010-16. Pravila ustrojstva i e`kspluatacii lokalizuyushix sistem bezopasnosti atomny`x stancij [NP-010-16. Rules for Design and Operation of Localized Safety Systems of Nuclear Power Plants]. Moskva [Moscow]. 2016 (in Russian).
- [6] Sposob natyazheniya armaturny`x kanatov. L.A. Bol`shov, V.N. Medvedev, V.F. Strizhov, A.N. Ul`yanov. Patent na izobretenie RUS 2548267. 20.04.2015 [The Method of Tension Reinforcing Ropes. L.A. Bolshov, V.N. Medvedev, V.F. Strizhov, A.N. Ulyanov. Patent for Invention RUS 2548267. 04/20/2015] (in Russian).
- [7] Medvedev V.N. Kiselev Alexander S., Kiselev Alexey S., Ulyanov A.N., Strizhov V.F., Potapov E.A. Naturny`e nablyudeniya na e`tape stroitel`stva zashhitnoj obolochki e`nergobloka № 3 Rostovskoj AE`S [Field Observations at the Construction Stage of the Containment of the Power Unit No. 3 of the Rostov NPP]. Global`naya yadernaya bezopasnost` [Global Nuclear Safety]. 2014. № 3 (12). P. 89-99 (in Russian).
- [8] Medvedev V.N. Kiselev Alexander S., Kiselev Alexey S., Ulyanov A.N., Strizhov V.F., Salnikov A.A. Rezul`taty` ispy`tanij zashhitnoj obolochki e`nergobloka № 3 Rostovskoj AE`S [Test Results of the Containments of the Rostov NPP Power Unit No. 3 ]. Global`naya yadernaya bezopasnost` [Global Nuclear Safety]. 2015 № 2 (15). P. 71-83 (in Russian).
- [9] Salnikov A.A. Medvedev V.N., Kiselev Alexander S., Kiselev Alexey S., Ulyanov A.N. Strizhov V.F., Skorikova M.I. Osobennosti NDS zashhitny`x obolochek AE`S na e`tape vozvedeniya, prednapryazheniya, priemo-sdatochny`x ispy`tanij i e`kspluatacii [Features of NPP Containments at the Stage of Construction, Prestressing, Acceptance Tests and Operation]. Bezopasnost`, e`ffektivnost` i e`konomika atomnoj e`nergetiki: materialy` 11-j mezhdunar. nauchno-texnich. konf. Moskva [Safety, Efficiency and Economics of Atomic Energy: materials of the 11th International Scientific and Technical Conference Moscow]. May 23-24, 2018. Moskva [Moscow]: Rosenergoatom Concern. 2018. P. 24-30 (in Russian).
- [10] Pimshin Yu.I., Klyushin E.B., Gubeladze O.A., Medvedev V.N., Burdakov S.M., Zayarov Yu.V. Vliyanie kрана кругового dejstviya na texnicheskoe sostoyanie stroyashhejsya zashhitnoj germetichnoj obolochki AE`S [The Effect of a Circular Action Valve on the Technical Condition of the Protective Containment of the NPP under Construction]. Global`naya yadernaya bezopasnost` [Global Nuclear Safety]. 2016. № 2 (19). P. 33-42 (in Russian).
- [11] Pimshin Yu.I., Medvedev V.N., Naumenko G.A., Char V.A., Zabaznov Yu.S. Ocenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zashhitny`x germetichny`x obolochek na primere

blokov Rostovskoj AE`S [Assessment of the Stress-Strain State of Containments on the Example of the Rostov NPP Units]. Izvestiya vy'sshix uchebny`x zavedenij. Geodeziya i ae`rofotos`emka [News of Higher Educational Institutions. Surveying and Aerial Photography]. 2017. № 3. P. 36-42 (in Russian).

Application of the Expert System for Assessing of the Stress-Strain State of Nuclear Power Plant Containments at the Stage of Construction and Operation

**V.N. Medvedev¹, Aleksandr S. Kiselev², Aleksei S. Kiselev³,
V.F. Strizhov⁴, A.N. Ul'yanov⁵, M.I. Skorikova⁶**

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (IBRAE RAS), Bol'shaya Tul'skaya St., 52, Moscow, Russia, 115191

¹ORCID iD: 0000-0003-2182-9769

Wos Researcher ID: U-8092-2018

e-mail: cont@ibrae.ac.ru

²ORCID iD: 0000-0002-1405-4080

Wos Researcher ID: U-8140-2018

e-mail: alkis_rrcki@mail.ru

³ORCID iD: 0000-0002-2450-4495

Wos Researcher ID: U-8820-2018

e-mail: kis-rncki@rambler.ru

⁴ORCID iD: 0000-0003-2244-6612

Wos Researcher ID: V-5004-2018

e-mail: vfs@ibrae.ac.ru

⁵ORCID iD: 0000-0003-4850-4825

Wos Researcher ID: U-8123-2018

e-mail: cont@ibrae.ac.ru

⁶ORCID iD: 0000-0002-9090-346X

Wos Researcher ID: U-8075-2018

e-mail: skorikova@ibrae.ac.ru

Abstract – Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences develops an expert system for assessing the stress-strain state of the containments of WWER-1000 NPP units. The expert system consists of the software package CONT, force control sensors in armored channels, sensors of instrumentation equipment. The paper provides a description of the expert system for assessing the stress-strain state of NPP containment and the features of its application.

Keywords: containment, stress-strain state, expert system.

ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.039

**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ Eu_2O_3
В КАЧЕСТВЕ ВЫГОРАЮЩЕГО ПОГЛОТИТЕЛЯ В РЕАКТОРЕ
ВВЭР-1200**

© 2019 М.А. Абу Сондос, В.М. Демин, В.И. Савандер

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Рассматривается задача об использовании выгорающих поглотителей (ВП) в реакторах типа ВВЭР для снижения объема жидкостного регулирования избыточного запаса реактивности при выгорании топлива. В данной работе в качестве ВП рассматривается природный европий в форме Eu_2O_3 , размещенный в интегрированном виде с урановым топливом в твэлах. Проведен анализ обеспечения ядерной и радиационной безопасности при использовании подобного топлива в реакторах ВВЭР-1200.

Ключевые слова: ТВЭГ, SERPENT, ТВС, ВВЭР-1200, выгорающий поглотитель, Eu_2O_3 , Gd_2O_3 , спектр гамма-излучения.

Поступила в редакцию 24.12.2018

После доработки 29.01.2019

Принята к публикации 03.02.2019

Введение

Для снижения концентрации бора в теплоносителе часть избыточной реактивности компенсируется выгорающими поглотителями, размещаемыми в твэлах [1-5]. Наибольшее распространение в качестве выгорающего поглотителя (ВП) получили природный гадолиний [6] и природный европий [1]. Из-за большого значения сечения поглощения гадолиния, особенно нечетными изотопами, его размещают в небольшом количестве твэлов (твэгов), а путем подбора весового содержания гадолиния в твэгах добиваются того, чтобы он полностью выгорал за одну кампанию. В отличие от гадолиния европий, имеющий небольшое значение сечения поглощения, размещают в большом количестве твэлов (твэгов), и при любом весовом содержании европия в твэгах он не выгорит до конца общей кампании.

В данном сообщении рассматривается вариант размещения европия в большом числе твэгов, но с уменьшенным содержанием европия в каждом из них.

Природный европий состоит из двух изотопов, ^{151}Eu и ^{153}Eu , их микросечения захвата тепловых нейтронов ($E = 0,0253$ эВ) и концентрации соответственно равны 9100 б и 47,44%; 312 б и 52,23% [7]. Изотоп ^{151}Eu выгорит за первую кампанию, а ^{153}Eu не выгорит до конца общей кампании.

Цель работы – добиться снижения максимального запаса реактивности в течение кампании, существенно не увеличивая радиоактивность ОЯТ.

В данной работе рассмотрено влияние повышения количества твэгов с использованием европия как выгорающего поглотителя на ядерную и радиационную безопасность работы реактора ВВЭР-1200 и сравнение его влияния с влиянием Gd.

Постановка задачи

Были выбраны несколько вариантов размещения твэгов в ТВС с разными количествами в них, и для каждого был проведен расчет изменения нейтронно-физических и радиационных характеристик ТВС от выгорания топлива и характеристик ОТВС в бассейне выдержки.

Исходные данные по загрузке европия в ТВЭгах, количестве ТВЭгов в ТВС и их геометрические характеристики для этих вариантов представлены в таблицах 1 и 2 и на рисунках 1а-1г. Для всех вариантов расчеты проводились при концентрации борной кислоты, равной нулю.

Таблица 1 – Основные геометрические параметры ТВС [Basic geometrical parameters of FA]

Параметр	ТВС
Длина топливного элемента, мм	3750
Масса UO_2 , кг	534
Плотность топлива (г/см^3)	10,5
Средняя температура топлива ($^{\circ}\text{K}$)	1000,0
Средняя плотность воды (г/см^3)	0,72
Средняя температура теплоносителя ($^{\circ}\text{K}$)	587,0
Количество тепловыделяющих элементов в одной ТВС	312
Внутренний/Наружный диаметр топливной таблетки, мм	1,4/7,57
Внутренний/Наружный диаметр оболочки, мм	7,73/9,1
Материал оболочки	сплав Э110
Центральная трубка	
Внутренний/Наружный диаметр, мм	11,0/13,0
Материал	сплав Э635
Направляющая трубка (18 шт.)	
Внутренний/Наружный диаметр, мм	10,9/12,6
Материал	сплав Э635

Таблица 2 – Количество ТВЭгов в ТВС [Number of the fuel rods with burnable absorbers in FA]

Вариант	Количество и состав топлива ТВЭлов
(без ВП) B_1	312 - 4,9% (^{235}U)
(12 Gd) B_2	300 - 4,95% (^{235}U) и 12 - 3,6% (^{235}U) с 5,0% Gd_2O_3
(12 Eu) B_3	300 - 4,95% (^{235}U) и 12 - 3,6% (^{235}U) с 5,0% Eu_2O_3
(24 Eu) B_4	288 - 4,9% (^{235}U) и 24 - 4,9% (^{235}U) с 2,5% Eu_2O_3
(36Eu) B_5	276 - 4,9% (^{235}U) и 36 - 4,9% (^{235}U) с 1,667% Eu_2O_3
(72Eu) B_6	240 - 4,9% (^{235}U) и 72 - 4,9% (^{235}U) с 0,834% Eu_2O_3
(72 Eu) B_7	240 - 4,9% (^{235}U) и 72 - 4,9% (^{235}U) с 0,834% Eu_2O_3 с обогащение 80% ^{151}Eu
(312 Eu) B_8	312 - 4,9% (^{235}U) и с 0,192% Eu_2O_3

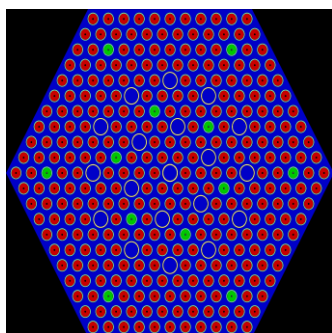


Рисунок 1а – ТВС- B_2 и B_3 [FA- B_2 and B_3]

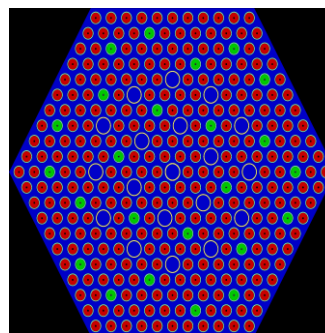
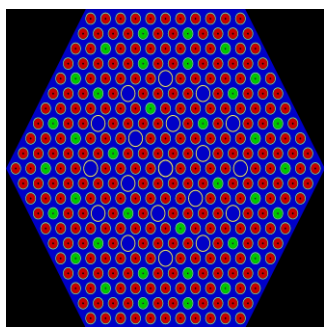
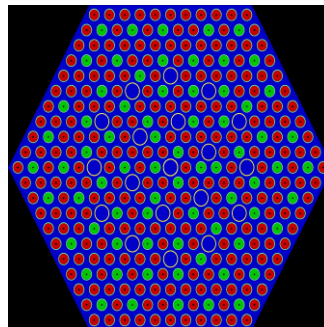


Рисунок 1б – ТВС- B_4 [FA- B_4]

Рисунок 1в – FA-B₅ и B₃ [FA-B₅ and B₃]Рисунок 1г – FA-B₆ [FA-B₆]

Вариант В₁, в котором отсутствует ВП, выбран в качестве эталонного для сопоставления с остальными, поскольку в этом варианте предполагается полностью жидкостное регулирование запаса реактивности. Вариант В₂ относится к топливной загрузке реактора типа ВВЭР-1200, в котором в основном применяется гадолиний. В вариантах В₃-В₈ вместо Gd используют Eu и увеличенное, по отношению к варианту В₂, количество твэгов (12, 24, 36, 72 и 312 твэг), причем, полная загрузка гадолиния и европия во всех этих вариантов такая же, как и для варианта В₂.

Влияние ВП на ядерные и радиационные характеристики топлива связано с термином «сильная блокировка потока тепловых нейтронов», которая зависит от двух величин:

- 1) сечения поглотителя тепловых нейтронов – прямая пропорциональная зависимость;
- 2) концентрации изотопов ВП – прямая пропорциональная зависимость.

Чем сильнее блокировка потока тепловых нейтронов, тем меньше эффективность ВП (тем меньшее количество ВП участвует в поглощении нейтронов).

Результаты

Все расчеты были выполнены с использованием кода SERPENT 2.1.30 [8], основанного на решении уравнения переноса нейтронов методом Монте-Карло, для сборки ТВС реактора ВВЭР-1200. Основное внимание уделено анализу зависимости коэффициента размножения нейтронов K_∞ от выгорания и распределения поля энерговыделения для выбранной ТВС. Средняя мощность ТВС была принята равной 1.96326×10^7 Вт, статистика расчетов составила 2 000 000. Ядерные данные были получены из библиотеки ядерных констант ENDFB7 [9].

Коэффициенты размножения нейтронов

На рисунке 2 представлены коэффициенты размножения нейтронов K_∞ в зависимости от глубины выгорания для всех рассмотренных вариантов.

Из-за большего сечения поглощения тепловых нейтронов гадолиний выгорает быстрее, чем европий, при этом необходимо отметить следующее:

- 1) влияние гадолиния сказывается в диапазоне выгорания до 14 МВт×сут/kgU, а влияние Eu прослеживается в течение всей кампании;
- 2) эффект сильной блокировки потока тепловых нейтронов при использовании гадолиния больше, чем для европия.

Поскольку коэффициент размножения нейтронов в ТВС с гадолинием при любом выгорании больше, чем при использовании европия, следовательно, использование европия позволяет снизить «вес» жидкостной системы регулирования. Увеличение числа твэгов при одновременном уменьшении содержания европия в каждом из них приводит:

- во-первых, к уменьшению начального коэффициента размножения нейтронов;
- во вторых, к снижению объема жидкостного регулирования.

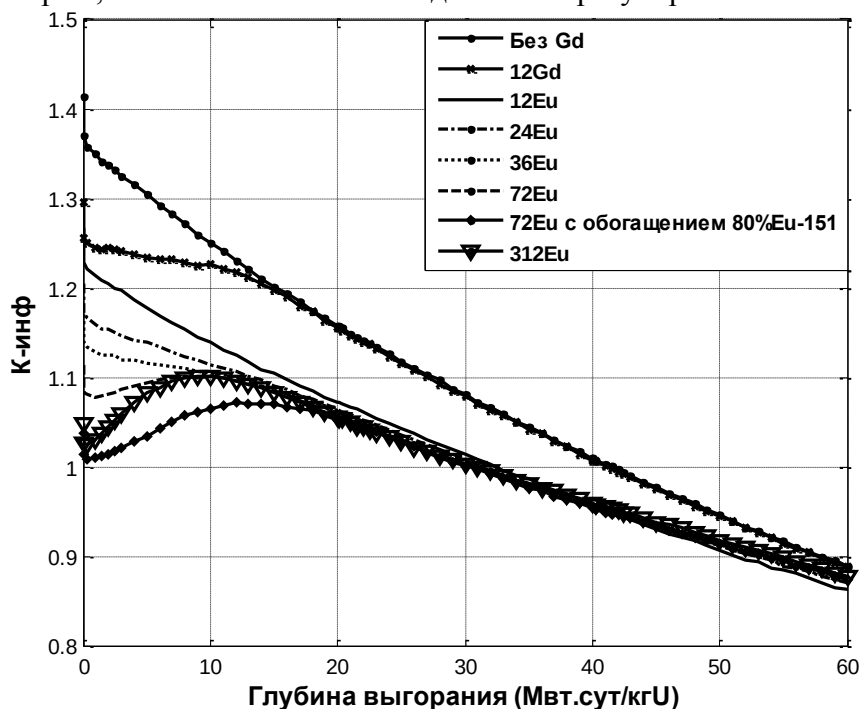


Рисунок 2 – Коэффициент размножения нейтронов в зависимости от глубины выгорания [Neutron multiplication factor depending on burnup depth]

Из-за большего сечения поглощения тепловых нейтронов гадолиний выгорает быстрее, чем европий, при этом необходимо отметить следующее:

3) влияние гадолиния сказывается в диапазоне выгорания до 14 МВт×сут/кгU, а влияние Eu прослеживается в течение всей кампании;

4) эффект сильной блокировки потока тепловых нейтронов при использовании гадолиния больше, чем для европия.

Поскольку коэффициент размножения нейтронов в ТВС с гадолинием при любом выгорании больше, чем при использовании европия, следовательно, использование европия позволяет снизить «вес» жидкостной системы регулирования. Увеличение числа твэгов при одновременном уменьшении содержания европия в каждом из них приводит:

- во-первых, к уменьшению начального коэффициента размножения нейтронов;
- во вторых, к снижению объема жидкостного регулирования.

Кроме того, независимо от начального обогащения европия по изотопу 151 (вариант В₇), конечная концентрация изотопа 153 и поведение коэффициента размножения нейтронов в конце кампании во всех вариантах (В₃ – В₈) примерно одинаковы. Отметим, что в вариантах В₆ – В₈ (72 твэга и больше), максимальное значение коэффициента размножения нейтронов достигается не в начале кампании.

Концентрация изотопов

Наличие ВП в топливе смещает нейтронный спектр в область эпитепловых нейтронов. И чем больше эффективность ВП, тем больше это смещение.

Гадолиний полностью выгорает до 14 МВт×сут/кгU, поэтому нейтронный спектр смещается в область быстрых нейтронов только в этом промежутке времени. А при использовании европия во-первых: эффективность ВП больше, что приводит к большему смещению нейтронного спектра в область быстрых нейтронов; во вторых,

влияние ВП продолжается до конца кампании. Это приводит к большему накоплению ^{239}Pu и ^{241}Pu (рис. 3 и 4). А с повышением числа твэгов – к еще большему повышению накопления ^{239}Pu и ^{241}Pu , которые вносят дополнительный вклад в энерговыделение работающего реактора.

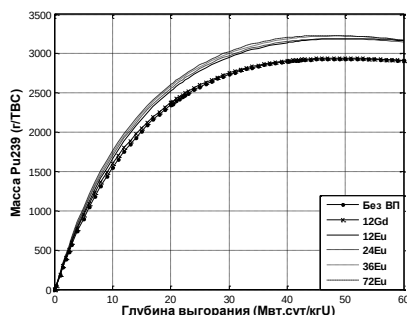


Рисунок 3 – Масса ^{239}Pu в зависимости от глубины выгорания [The mass of ^{239}Pu depending on the burnup]

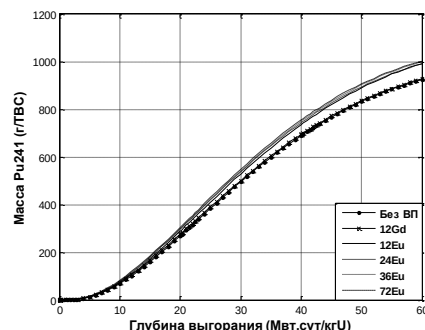


Рисунок 4 – Масса ^{241}Pu в зависимости от глубины выгорания [The mass of ^{241}Pu , depending on the burnup]

На рисунках 3 и 4 видно, что поскольку эффективность Eu больше чем Gd, то накопление ^{239}Pu и ^{241}Pu больше. При этом с повышением числа твэгов блокировка тепловых нейтронов уменьшается, эффективность ВП повышается и смещение нейтронного спектра в область эпитепловых нейтронов усиливается, что приводит к повышению накопления ^{239}Pu и ^{241}Pu . Накопление ^{239}Pu и ^{241}Pu , которые вносят дополнительный вклад в энерговыделение работающего реактора, приводит к увеличению содержания остаточного невыгоревшего ^{235}U к концу кампании.

Хранение ОЯТ

С использованием европия в топливе как ВП накопление изотопа ^{154}Eu повышается. Он образуется путем захвата нейтронов изотопом ^{153}Eu ; кроме того, выход ^{154}Eu при делении ^{239}Pu больше, чем при делении ^{235}U в 3,5 раза [10]. Спектр гамма-излучения изотопа ^{154}Eu имеет высокую энергию и большой период полураспада, поэтому его наличие в отработавшем топливе ухудшает радиационные свойства ОЯТ. А при использовании гадолиния, который полностью выгорает в первой кампании, соответствующие свойства ОЯТ практически не изменяются.

На рисунках 5 и 6 представлены зависимости остаточного энерговыделения и мощности излучения гамма-квантов ОЯТ в зависимости от времени выдержки.

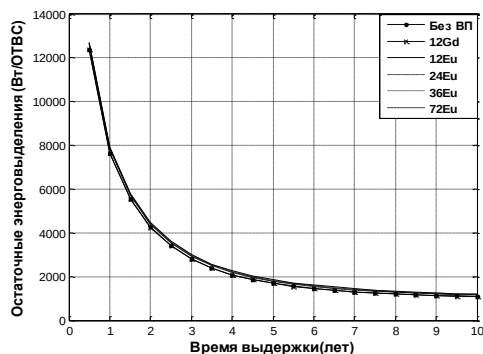


Рисунок 5 – Остаточное энерговыделение в зависимости от времени выдержки [Residual energy depending on cooling time]

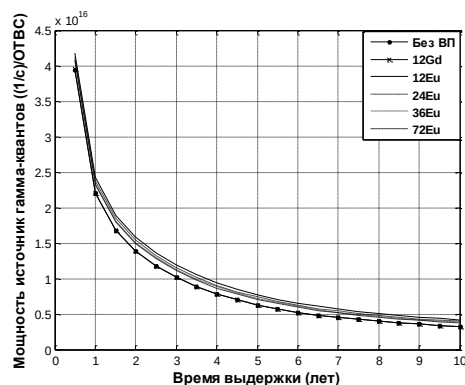


Рисунок 6 – Мощность излучения гамма-квантов в зависимости от времени выдержки [Source rate of gamma-quantum depending on the cooling time]

Прежде всего, отметим, что использование европия в топливе повышает остаточное энерговыделение и увеличивает мощность излучения гамма-квантов. Это может потребовать немного более длительного охлаждения отработавшего топлива в бассейне выдержки реактора.

Спектр гамма-излучения ОЯТ после пяти лет выдержки для всех вариантов представлен на рисунке 7.

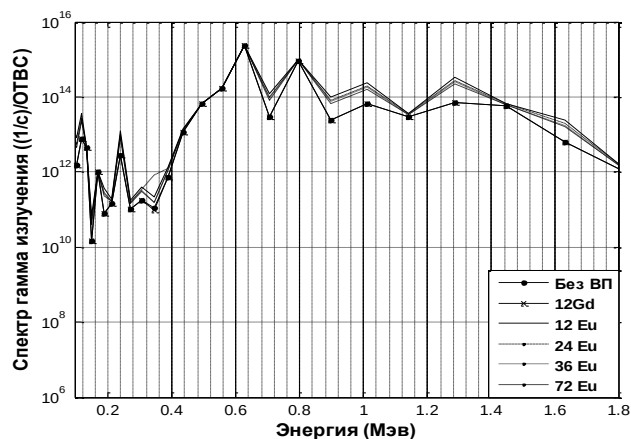


Рисунок 7 – Спектр интенсивности гамма излучения после пяти лет выдержки [Spectrum gamma source after five years of cooling]

Видно, что спектр гамма-излучения для всех рассмотренных вариантов расчета (B_1 - B_6) почти одинаков, кроме диапазонов энергий, в которых основной вклад в спектральное гамма-излучение дают фотоны изотопов Eu, важнейшим из которых является ^{154}Eu , что и может потребовать более длительного охлаждения ОЯТ.

В таблице 3 представлены остаточное энерговыделение и интенсивность гамма-излучения ОЯТ после пяти лет выдержки для вариантов B_1 - B_6 .

Таблица 3 – Остаточное энерговыделение и интенсивность гамма-излучения после пяти лет выдержки [Residual energy and the energy spectrum of gamma radiation after five years of cooling]

Параметры	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6
Остаточное энерговыделение (Вт/ОТВС)	1687,1	1684,1	1851,6	1818,3	1797,0	1786,5
Интенсивность гамма-излучения (Вт/ОТВС)	624,3	622,2	744,3	718,9	702,4	690,6
Доля энергии гамма-излучения от полного энерговыделения	37,0%	37,0%	40,2%	39,5%	39,1%	38,7%

Из таблицы 3 видно, что использование Gd в топливе не изменяет ядерные и радиационные характеристики ОЯТ, а Eu повышает остаточное энерговыделение и долю энергии гамма-излучения от общего энерговыделения, особенно при 12 твэгах. Использование ТУК-13 для транспортирования ОТВС после пяти лет выдержки возможно для первого и второго вариантов (без европия), а в варианте B_3 наши расчеты показывают, что потребуются еще как минимум полгода дополнительной выдержки ОЯТ. Аналогичные изменения при соответствующей небольшой корректировке потребуются для вариантов B_4 , B_5 и B_6 .

Выводы

Использование европия вместо гадолиния в ядерном топливе реактора ВВЭР-1200 приводит как к положительным, так и к отрицательным эффектам.

Положительные эффекты:

1) Использование европия обеспечивает большее снижение объема жидкостного регулирования.

2) Использование европия ускоряет накопление изотопов ^{239}Pu и ^{241}Pu , которые вносят дополнительный вклад в энерговыделение работающего реактора.

Отрицательные эффекты:

1) Из-за накопления радиоактивности изотопа ^{154}Eu и изотопов плутония может потребоваться увеличение времени выдержки ОЯТ в бассейне выдержки.

2) Использование европия снижает выгорание топлива, что приводит к увеличению расхода природного урана. Но при повторном использовании топлива этот эффект будет играть значительно меньшую роль.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдельгафар Галахом, А. Исследование возможности использования сплава европия и Пирекса в качестве сжигаемого поглотителя в PWR [Текст] / А. Абдельгафар Галахом // *Анналы ядерной энергии*. – Том 110. – Декабрь 2017. – С. 1127-1133.
2. Стогов, Ю.В. Перспективные технологии использования оксидного уран-гадолиниевого топлива в легководных реакторах [Текст] / Ю.В. Стогов [и др.] // *Материалы XIV семинара по проблемам физики реакторов*. – Москва : МИФИ, 2006. – С. 45-47.
3. Балистайри, Д. Исследование $\text{UO}_2/\text{Gd}_2\text{O}_3$ топливной смеси [Текст] / Д. Балистайри // *МАГАТЭ-ТекДос-1036*. – Вена (Австрия). – 1998. – С. 63-72.
4. Ермолин, В.С. О размещении гадолиния в центральном отверстии твэлов водо-водяных реакторов [Текст] / В.С. Ермолин, В.С. Окунев // *Физико-технические проблемы ядерной энергетики*. – Научная сессия МИФИ-2008. – С. 101-102.
5. Бергельсон, Б.Р. Глубина выгорания ядерного топлива ВВЭР с разными поглотителями [Текст] / Б.Р. Бергельсон [и др.] // *Атомная энергия*. – Т. 109. – Вып. 4. – Октябрь 2010. – С. 240-245.
6. Выговский, С.Б. Физические и конструкционные особенности ядерных энергетических установок с ВВЭР [Текст] / С.Б. Выговский [и др.]. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2011. – 376 с.
7. Жаконг Ли, Дзюньити Хори, Кен Накадзима, Тадафуми Сано, Самуол Ли Нейтронозахватной крест измерений раздел 151,153 ЕС через пару C_6D_6 детекторы [Текст]. – Стр. 1046-1057. – Получено 14 октября 2016, принято 23 мая 2017, опубликовано онлайн: 17 июля 2017. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00223131.2017.1344575> (дата обращения: 10.11.2018).
8. Липаннен, Дж. SERPENT – код расчета выгорания физики реактора Монте-Карло с непрерывной энергией [Текст] / Дж. Липаннен // *Центр технических исследований VTT Финляндии*. – 18 июня 2015.
9. Чедвик, М.Б. ENDF/B-VII.1 ядерные данные для науки и техники: сечения, ковариации, выходы продуктов деления и данные распада [Текст] / М.Б. Чедвик [и др.] // *Листы данных*. – 112. – 2011. – С. 2887-2996. – 10.1016/Дж.НСР.2011.11.002.
10. Уиллман, С. Применение гамма-спектроскопии отработавшего ядерного топлива для целей гарантий и инкапсуляции [Текст] / С. Уиллман. – *Acta Universitatis Upsaliensis*. Цифровые всеобъемлющие резюме диссертаций Уппсальского научно-технического факультета 212. Уппсала. – 2006. – 81 с. ISBN 91-554-6637-0.

REFERENCES

- [1] Abdelghafar Galahom A. Issledovanie vozmozhnosti ispol'zovaniya splava evropiya i Pireksa v kachestve szhigaemogo poglotitelya v PWR [Study of Possibility of Europium and Pyrex Alloy Using as Burnable Absorber in PWR]. *Annaly` yadernoj e`nergii* [Annals of Nuclear Energy]. Volume 110. December 2017. P. 1127-1133 (in Russian).
- [2] Stogov Yu.V., Belousov N.I. Savander V.I. et al. Perspektivny`e tehnologii ispol'zovaniya oksidnogo uran-gadolinievogo topliva v legkovodny`x reaktorax [Promising Technologies for the Use of Uranium-Gadolinium Oxide Fuel in Light-Water Reactors]. *Materialy` XIV seminar po problemam fiziki reaktorov* [Proceedings of the XIV Seminar on Reactor Physics]. Moscow:

- MEPhI. 2006. P. 45-47 (in Russian).
- [3] Balestieri D. Issledovanie UO₂/Gd₂O₃ toplivnoj smesi. IAEA-TECDOC-1036. Vienna (Austria). 1998. P. 63-72.
- [4] Ermolin V.S., Okunev V.S. O razmeshhenii gadoliniya v central'nom otverstii tve'lov vodo-vodyany'x reaktorov [Placement of Gadolinium in the Central Opening of Water-Water Reactor Fuel Rods]. Fiziko-texnicheskie problemy yadernoj e'nergeti [Physical and Technical Problems of Nuclear Power Engineering]. Nauchnaya sessiya MIFI [Scientific Session of MEPhI]. 2008. P. 101-102 (in Russian).
- [5] Bergelson B., Belonog V., Gerasimov A. et al. Glubina vy'goraniya yadernogo topliva VVE`R s razny'mi poglotitelyami [Depth of Burn-Up of WWER Nuclear Fuel with Different Absorbers]. Atomnaya e'nergiya [Atomic Energy]. V. 109 Vol. 4 October 2010. P. 240-245 (in Russian).
- [6] Vygovskii S.B., Ryabov N.Oh, Semenov A.A. et al. Fizicheskie i konstrukcionny'e osobennosti yaderny'x e'nergeticheskix ustanovok s VVE`R [Physical and Structural Features of Nuclear Power Plants with WWER]. Moskva. NIYaU MIFI [Moscow. National Research Nuclear University «MEPhI»]. 2011. 376 p. (in Russian).
- [7] Jaehong Lee Jun-ichi Hori, Ken Nakajima, Tadafumi Sano & Samyol Lee. Neutron capture cross section measurements of ^{151,153}Eu using a pair of C6D6 detectors. Pages 1046-1057 | Received 14 Oct 2016, Accepted 23 May 2017, Published online: 17 Jul 2017.
- [8] Leppänen J. SERPENT – a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. VTT Technical Research Centre of Finland. (June 18, 2015).
- [9] Chadwick M.B., et al. ENDF/B-VII.1 nuclear data for science and technology: cross sections, covariances, fission product yields and decay data. Nucl. Data Sheets, 112 (2011). P. 2887-2996, 10.1016/j.nds.2011.11.002.
- [10] Willman, C. 2006. Applications of Gamma Ray Spectroscopy of Spent Nuclear Fuel for Safeguards and Encapsulation. Acta Universitatis Upsaliensis. Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 212. 81 p. Uppsala. ISBN 91-554-6637-0.

Assess of Possibility of Eu₂O₃ Using as Burnable Absorber in WWER-1200 Reactor

M.A. Abu Sondos¹, V.M. Demin², V.I. Savander³

Institute of Nuclear Physics and Technology (INP&T), National Research Nuclear University «MEPhI», Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409

¹ORCID ID: 0000-0003-3954-151X

Wos Researcher ID: E-2735-2019

e-mail: MAbusondos@mephi.ru

²ORCID ID: 0000-0003-3894-9396

Wos Researcher ID: E-2750-2019

e-mail: VMDemin@mephi.ru

³ORCID ID: 0000-0001-9309-5616

Wos Researcher ID: E-2743-2019

e-mail: VISavander@mephi.ru

Abstract – The paper deals with the problem of using burnable absorbers (BAs) in WWER reactors to reduce the volume of liquid regulation of excess fuel burnup reactivity. It considers natural europium in the form of Eu₂O₃, placed in an integrated form with uranium fuel in fuel rods. The analysis of nuclear and radiation safety in the use of such fuel in VVER-1200 reactors is carried out.

Keywords: TVEG, SERPENT, FA, WWER-1200, burnable absorbers, Eu₂O₃, Gd₂O₃, gamma radiation source spectrum.

ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621(075.8)

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ГЛУБИНЫ
ПРОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКЕ
ОТВЕТСТВЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ ПО ОСЦИЛЛЯЦИИ СВАРОЧНОЙ
ВАННЫ

© 2019 Э.А. Гладков*, Н.А. Симакова**, Р.А. Перковский*, Т.В. Бродягина***

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (МГТУ), Москва, Россия

**Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета (МИФИ), Волгодонск, Россия

***Аттестационный Центр Городского Хозяйства (АЦГХ), Москва, Россия

В статье изложены результаты исследований, выполненных для построения автоматической системы регулирования глубины проплавления при аргонодуговой сварке по сигналам о колебаниях сварочной ванны. Предложены методы контроля и алгоритмы управления процессом аргонодуговой сварки ответственных конструкций по осцилляции сварочной ванны и выделения спектра колебаний.

Ключевые слова: сварочная ванна, величина проплавления, оптический датчик, качество сварки.

Поступила в редакцию 18.12.2018

После доработки 24.01.2019

Принята к публикации 11.02.2019

При импульсно-дуговой сварке при полном проплавлении стыка сварочную ванну можно представить геометрической моделью, имеющей сферическую форму [1]. Рассмотрим случай, когда на сварочную ванну в процессе сварки действуют сила давления дуги F_d , сила тяжести F_g , сила поверхностного натяжения $F_{n.n}$ и сила вязкого трения $F_{в.т}$ (рис. 1); при выполнении условия (1) провисание сварочной ванны $z = z_0$.

Условие равновесия сварочной ванны в общем виде записывается уравнением:

$$\sum_{i=1}^N F_i = 0 \quad (1)$$

где F_i – силы, действующие на сварочную ванну.

Выражения для сил F_i имеют вид:

$$F_d = k \cdot I_d^2; F_g = m_{np} \cdot g; F_{n.n} = \frac{4 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot a^2 \cdot z_0}{a^2 + z_0^2};$$
$$F_{в.т} = 4 \cdot \pi \cdot \delta \cdot \eta \cdot \frac{(z_0^2 + a^2) \cdot a^2}{(a^2 - z_0^2)^2} \cdot v_0, \quad (2)$$

где η – коэффициент вязкого трения в слоях сварочной ванны при ее движении;

k – коэффициент пропорциональности;

v_0 – скорость движения слоев расплавленного металла.

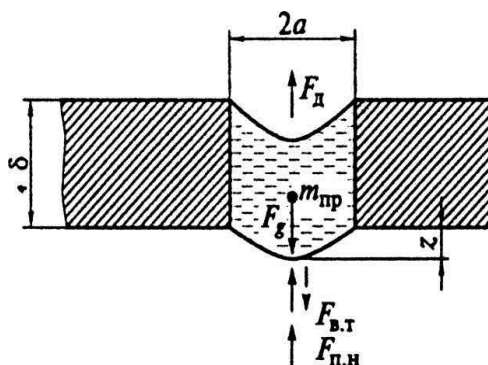


Рисунок 1 – Сферическая модель сварочной ванны: F_d – сила давления дуги; F_g – сила тяжести сварочной ванны; $F_{в.т}$ – силы вязкого трения при колебании ванны; $F_{п.н}$ – силы поверхностного натяжения с наружной и внутренней поверхности сварочной ванны; a – полуширина сварочной ванны; $m_{пр}$ – приведенная масса сварочной ванны; δ – толщина свариваемого металла; z – провисание сварочной ванны [Spherical welding pool model: F_d – arc pressure force; F_g – gravity of the welding pool; $F_{в.т}$ – viscous friction force when the bath oscillates; $F_{п.н}$ – surface tension forces from the outer and inner surfaces of the welding pool; a – half-width of the primary bath; $m_{пр}$ – reduced mass of the welding pool; δ – thickness of the metal being welded; z – sagging welding pool]

$$m_{пр} = \int_S \left[\frac{z(x)}{z(x \approx 0)} \right]^2 dm. \quad (3)$$

Динамика поведения сварочной ванны при вариации действующих на нее сил определяется уравнением:

$$m_{пр} \cdot z'' = \sum_{i=1}^N P_i \quad (4)$$

Используя выражения (2) и полагая, что:

$$z = z_0 \pm \Delta z; \quad I_d = I_0 \pm \Delta I \quad (5)$$

можно записать линеаризованное выражение для уравнения (4):

$$\frac{m_{пр}}{2} \cdot \Delta z'' + 4 \cdot \pi \cdot \delta \cdot \eta \cdot \frac{(z_0^2 + a^2)}{(a^2 - z_0^2)^2} \cdot \Delta z = 2 \cdot k \cdot (I_0 + \Delta I) \quad (6)$$

Результат решения уравнения (6) при скачкообразном изменении сварочного тока в момент времени t_1 приведен на рисунке 2.

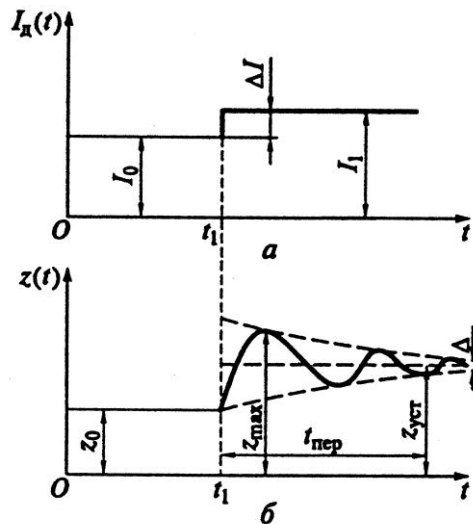


Рисунок 2 – График колебаний сварочной ванны при скачке сварочного тока в момент времени t_1 : а – закон изменения сварочного тока; б – график колебания сварочной ванны; I_0 , I_1 – сварочный ток при равновесии сварочной ванны и после скачка тока; z_0 , $z_{\max}$ и $z_{уст}$ – провисание сварочной ванны при ее равновесии, максимальное и установившееся; $t_{пер}$ – время переходного процесса; $\Delta I = I_1 - I_0 = (0,02 \dots 0,05) \cdot z_{уст}$ [The oscillation graph of the welding pool when the welding current jumps at a time t_1 : a – is the law of welding current variation; b – graph of welding bath oscillations; I_0 , I_1 – welding current at equilibrium of the welding and after a surge current; z_0 , $z_{\max}$ и $z_{уст}$ – sagging of the welding pool at its equilibrium, maximal and steady; $t_{пер}$ – time of transition; $\Delta I = I_1 - I_0 = (0,02 \dots 0,05) \cdot z_{уст}$]

Сварочная ванна с момента времени t_1 совершает затухающие колебания. Частота и амплитуда колебаний сварочной ванны зависят от параметров δ , η , σ , а. Легко показать, что число колебаний сварочной ванны равно:

$$n = \frac{t_{пер} \cdot \sqrt{1 - \xi^2}}{2 \cdot \pi \cdot T}, \quad (7)$$

где $\xi = \frac{\delta \cdot \eta \cdot (a^2 + z_0^2) \cdot a}{\sqrt{\frac{m \cdot \sigma}{\pi}} \cdot (a^2 - z_0^2)^{5/2}}$ – коэффициент демпфирования;

$$T = \frac{a^2 + z_0^2}{4 \cdot a} \cdot \sqrt{\frac{m}{\pi \cdot \sigma \cdot (a^2 - z_0^2)}} \quad \text{– постоянная времени; } m = 2 \cdot m_{np}.$$

Принцип работы системы контроля проплавления стыка с использованием информации о колебаниях сварочной ванны заключается в воздействии на сварочную ванну кратковременных (несколько миллисекунд) импульсов тока. Частота и амплитуда колебаний сварочной ванны зависят от ее массы. Масса сварочной ванны функционально связана с глубиной проплавления стыка. Случай неполного проплавления стыка соответствует сварочной ванне с малой массой. При воздействии импульсом тока в ней возникают свободные колебания малой амплитуды и большой частоты. При полном проплавлении стыка сварочная ванна имеет большую массу, и после воздействия кратковременного импульса тока в ней возникают затухающие колебания с большой амплитудой и меньшей частотой. На практике, когда имеет место

переход от непровара стыка к полному проплавлению, частота колебаний сварочной ванны ступенчато изменяется в пределах от 150 до 50 Гц (рис. 3). Контроль изменения частоты колебаний сварочной ванны позволяет получить информацию о качестве формирования шва в процессе сварки.

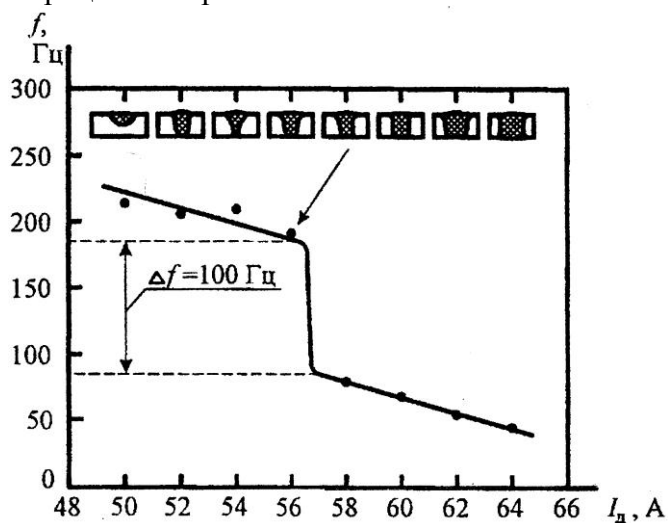


Рисунок 3 – График изменения частоты колебаний сварочной ванны при изменении глубины проплавления стыка в зависимости от изменения тока дежурной дуги [The graph of the variation of the oscillation frequency of the welding pool with a change in the depth of penetration of the joint versus the change in the current of the pilot arc]

Осциллограммы напряжений на рисунке 4 отражают информацию о колебаниях внешнего зеркала сварочной ванны при воздействии импульса тока с амплитудой I_n . Изменение напряжения дуги при переходном процессе вызвано изменением длины дуги из-за колебания поверхности сварочной ванны [2].

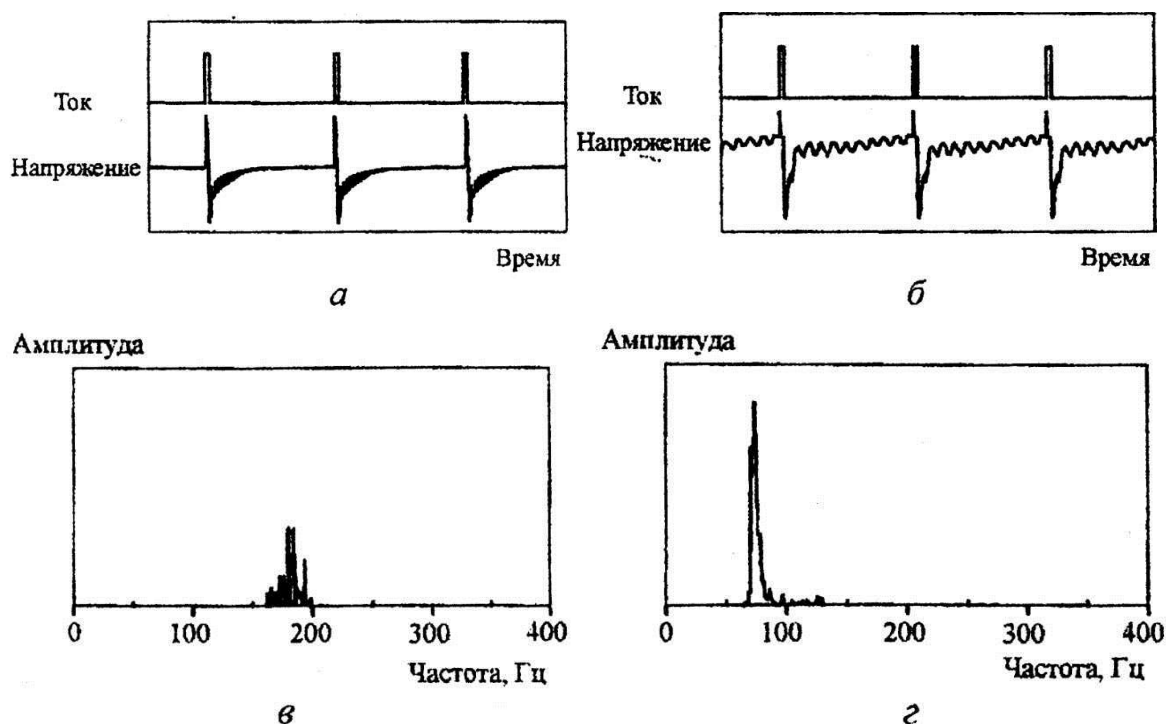


Рисунок 4 – Осциллограммы тока и напряжения (а, б) и соответствующий им частотный спектр колебаний сварочной ванны для случаев неполного проплавления стыка (в) и полного проплавления стыка (г) [Oscillograms of current and voltage (a, b) and the corresponding frequency spectrum of welding pool oscillations for cases of incomplete penetration of the joint (c) and complete penetration of the joint (d)]

Чувствительность системы по напряжению дуги к колебаниям поверхностного слоя сварочной ванны выше при ведении процесса сварки на короткой дуге. Для выделения колебаний напряжения при воздействии на сварочную ванну каждого импульса используется разностный сигнал между текущими и номинальными значениями напряжений дуги (принцип компенсации) (рис. 5).

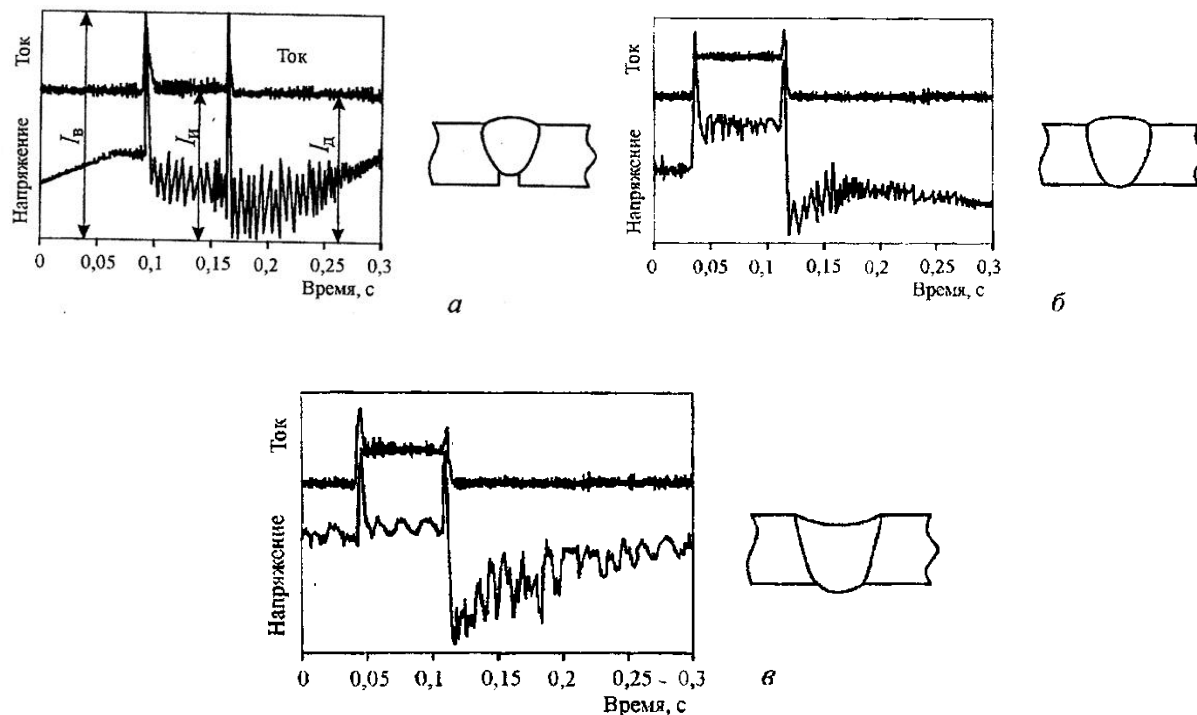


Рисунок 5 – Осциллограммы тока и напряжения при импульсно-дуговой сварке с дополнительными кратковременными импульсами возбуждения, колебаний сварочной ванны: а – неполное проплавление стыка (непровар); б – нормальное проплавление стыка; в – полное проплавление стыка с провисанием шва (случай, близкий к прожогу) [Oscillograms of current and voltage during pulsed arc welding with additional short-term excitation pulses, welding pool oscillations: a – incomplete penetration of the joint (lack of welding) b – normal penetration of the joint; c – complete penetration of the joint with sagging of the seam (a case close to the burn-through)]

Для повышения чувствительности к изменению проплавления стыка на рабочие импульсы тока и напряжения от источника питания дуги накладывают кратковременные (несколько миллисекунд) импульсы, не влияющие на проплавляющую способность дуги, но повышающие колебательный характер сварочной ванны, – так называемые импульсы возбуждения.

Недостатком способа контроля глубины проплавления являются малые изменения напряжения дуги (не более 0,5 В) при колебании поверхности сварочной ванны. Для надежного детектирования малых изменений напряжения дуги следует проводить сварку со стабилизированным источником питания дуги на минимальном напряжении дуги (короткая длина дуги), и лучше в среде гелия. Чувствительность способа изменяется при переходе на сварку в различных пространственных положениях.

Другой способ индикации колебаний сварочной ванны, который оказался более надежным на практике, заключается в использовании фотодиодных оптических устройств [3, 4].

1) Оптический датчик. Для измерения колебаний сварочной ванны в системе контроля используется принцип оптического обнаружения. Данная технология измерения придает системе большую надежность и простоту применения. Сварочная

ванна имеет блестящую (зеркальную) поверхность, форма которой по мере колебаний изменяется, модулируя отраженный свет дуги. Данная модуляция состоит из двух эффектов: модуляции из-за изменения скрытой составляющей длины дуги и изменения формы сварочной ванны, которая действует как зеркало. Если поместить входной объектив оптического волокна для сбора части модулированного света вблизи зоны сварки и передать по нему излучение на фотодиод (рис. 6), то электрический сигнал от фотодиода будет содержать информацию о частоте колебания сварочной ванны. Сигналы, полученные таким образом, имеют низкие уровни помех. Колебания сварочной ванны формируют на выходе фотодиода четкий электрический сигнал, который впоследствии анализируется с помощью компьютера.

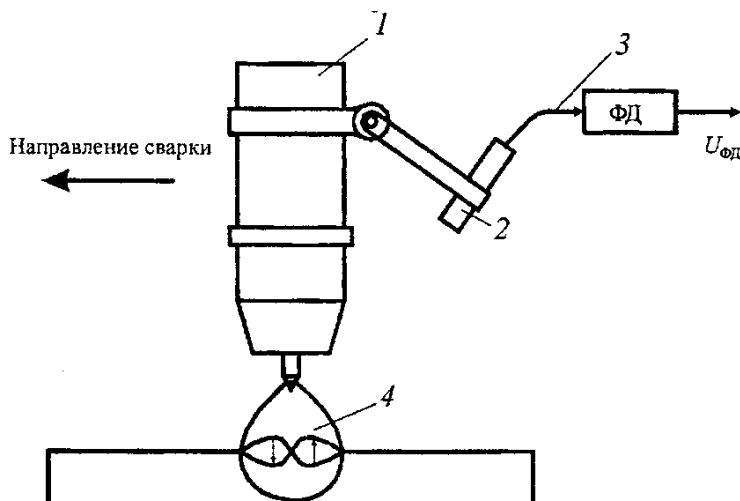


Рисунок 6 – Схема установки оптического датчика на сварочной горелке: 1 – сварочная горелка; 2 – объектив; 3 – оптическое волокно; 4 – поверхность сварочной ванны [Installation scheme of the optical sensor on the welding torch: 1 – welding torch; 2 – lens; 3 – optical fiber; 4 – surface of the welding pool]

Реализация сигнала с фотодиода и его спектр для случая неполного проплавления стыка (непровара) показаны на рисунке 7.

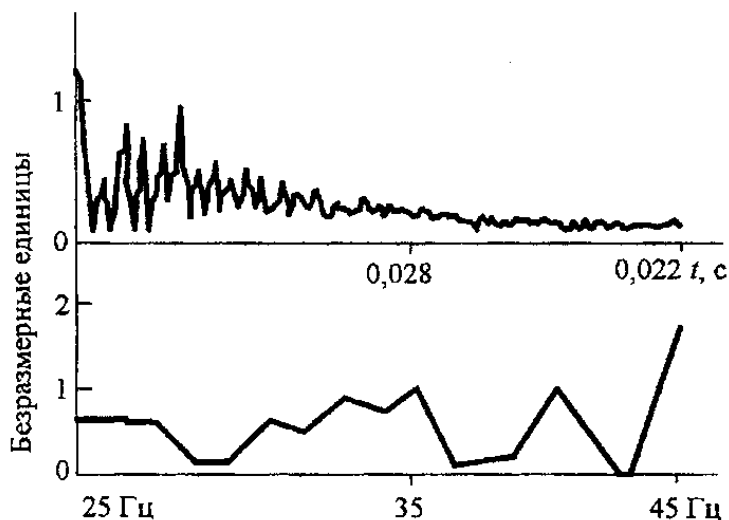


Рисунок 7 – Временной и частотный графики по осцилляции сварочной ванны при неполном проплавлении, полученные при обработке сигнала на выходе оптического датчика [Time and frequency charts for the oscillation of the welding pool with incomplete penetration, obtained by processing the signal at the output of the optical sensor]

2) Информация о частоте колебаний сварочной ванны, присутствующая в сигнале от фотодиода, определяется преобразованием Фурье с помощью специального программного обеспечения [5].

Примеры спектра Фурье, полученные для двух типичных реализаций (полного и неполного проплавления стыка), показаны на рисунках 4 и 5. Преобразование осуществляется с помощью технологии быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Определив частоту колебаний сварочной ванны, система контроля проплавления стыка вырабатывает соответствующее корректирующее воздействие. Желаемое значение частоты в герцах получают простым расчетом по формуле (8):

$$f = \sqrt{\frac{\sigma_x \cdot const}{m}} \quad (8)$$

где m – масса ванны;

σ_x – поверхностное натяжение материала;

константа формы для реальных сварочных ванн приблизительно равна единице.

Из уравнения (8) ясно, что чем больше масса ванны, тем ниже частота ее колебаний. Следовательно, если требуется выполнить сварку с полным проплавлением, нужна сварочная ванна большей массы. Согласно формуле (8) частота колебаний такой ванны будет снижена. Массу сварочной ванны можно оценить по формуле (9):

$$m \approx \frac{\rho \cdot h \cdot \pi \cdot d^2}{4}, \quad (9)$$

где ρ – плотность;

h – толщина свариваемого материала;

d – диаметр сварочной ванны.

С учетом уравнения (9) формула (8) будет иметь вид:

$$f = \frac{2}{d} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_x}{\pi \cdot \rho \cdot h}} \quad (10)$$

При импульсно-дуговой сварке неплавящимся электродом с полным проплавлением стыкового соединения из аустенитной стали при $\rho = 8000 \text{ кг/м}^3$ и $\sigma_x = 1$ формула (10) примет вид:

$$f = \frac{0,0126}{d \cdot \sqrt{h}}.$$

Для шва шириной 7 мм и толщиной пластины $h = 3$ мм расчетная частота колебаний сварочной ванны составляет $f = 31$ Гц.

Функциональна схема системы управления проплавлением стыка по осцилляции сварочной ванны приведена на рисунке 8.

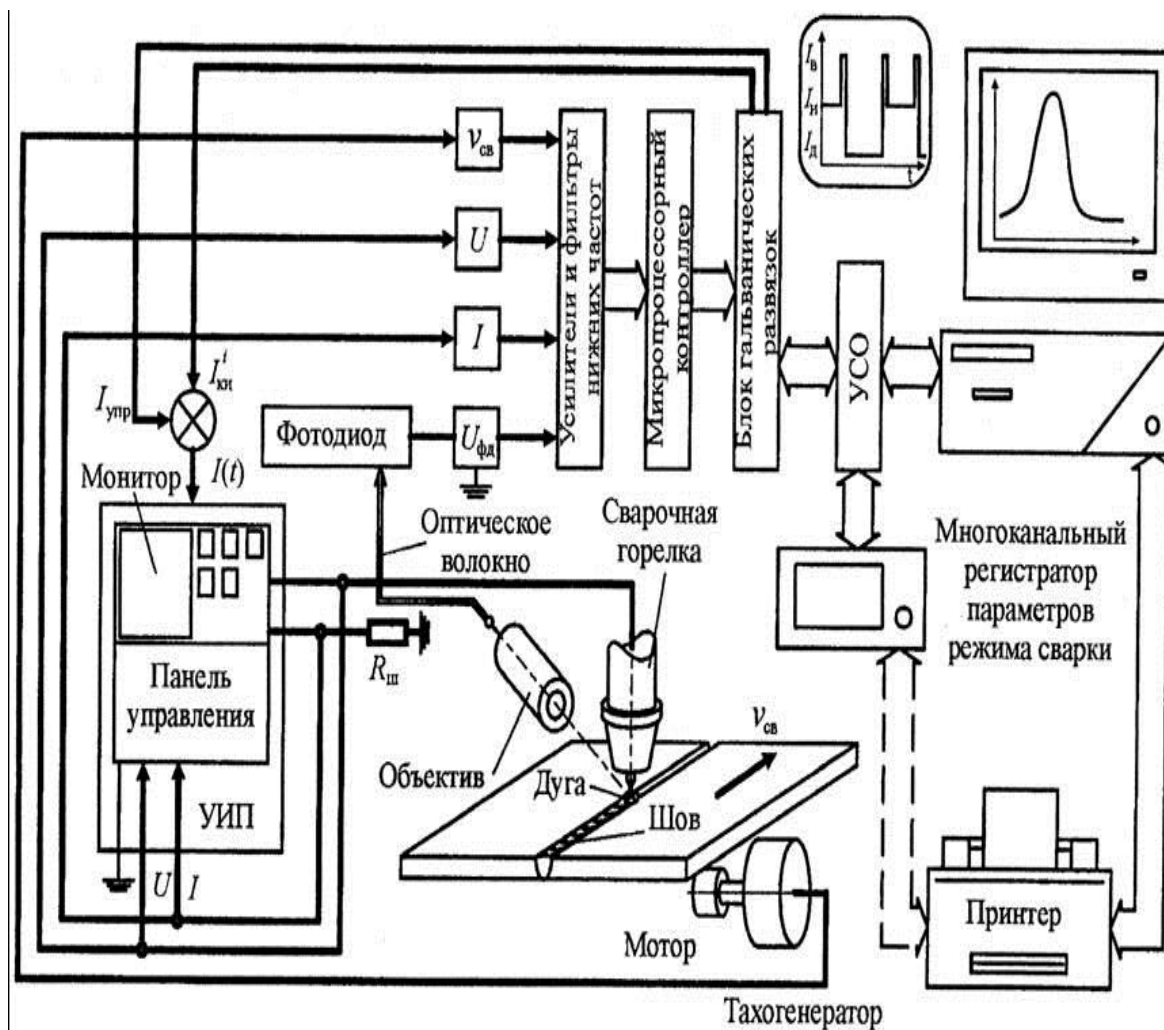


Рисунок 8 – Функциональная схема системы управления проплавлением по осцилляции сварочной ванны
[Functional diagram of the penetration control system for welding pool oscillation]

В системе для реализации импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом используется инверторный управляемый источник питания (УИП), обеспечивающий стабилизацию параметров тока и напряжения на уровне заданных уставок через панель управления или от компьютера. Колебания сварочной ванны в каждом цикле импульсно-дуговой сварки вызываются кратковременными импульсами возбуждения длительностью 2...3 мс, накладываемыми на рабочий импульс в начале и конце его действия в каждом цикле сварки (рис. 9). Информация о колебаниях сварочной ванны снимается оптическими или электрическими (по напряжению дуги) датчиками. Схема обработки сигналов в системе управления включает следующие этапы:

- фильтрацию сигналов с помощью низкочастотного фильтра [6];
- защиту схемы преобразования сигнала от мощной аддитивной помехи с помощью блока гальванической развязки в цифровой и аналоговой частях системы [7];
- оцифровку сигналов и передачу их через устройство связи с объектом (УСО) для частотной обработки в компьютере [8];
- частотную обработку сигналов по программе обработки информационного сигнала с использованием БПФ [9].

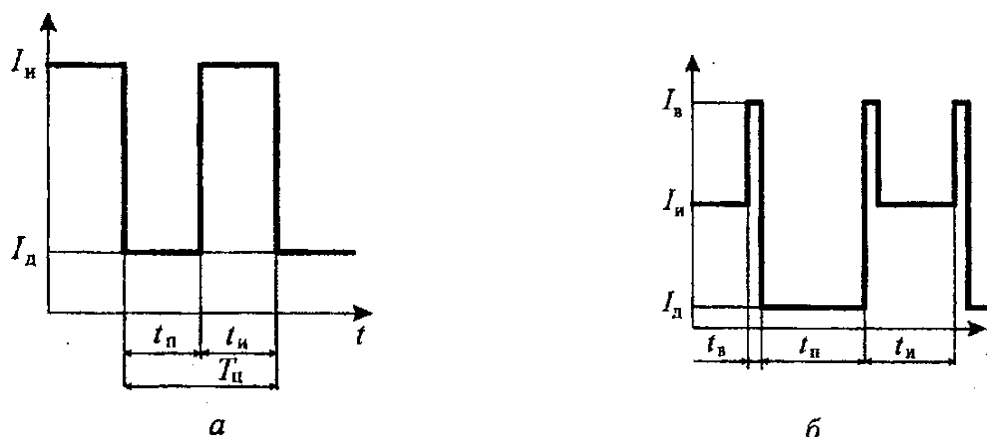


Рисунок 9 – Форма импульсов при импульсно-дуговой сварке: а – рабочий импульс (I_n , t_n); б – импульс возбуждения (I_n , t_n), наложенный на начало рабочего импульса [Pulse shape during pulsed arc welding: a – working impulse (I_n , t_n); b – excitation pulse (I_n , t_n), imposed on the beginning of the working pulse]

В структуру системы автоматического управления помимо компьютера с набором специальных периферийных устройств (принтер, дисплей, мышь) входят усилительные, измерительные и преобразовательные устройства типа АЦП, ЦАП, многоканальный цифровой регистратор основных параметров сварки (импульсного тока, напряжения дуги, скорости сварки, сигнала от фотодиода), формирующий паспорт на технологический процесс [10]. Записанные в регистраторе в цифровом виде данные о параметрах процесса сварки в автономном режиме (без компьютера) при необходимости могут быть распечатаны на принтере или в режиме off-line обработаны на компьютере.

Система управления по программе БПФ вычисляет амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) колебаний сварочной ванны в период действия каждого импульса сварки и импульса паузы по сигналу с оптического датчика или электрического датчика (рис. 10).

Качество провара	Рабочий импульс (I_n , t_n)	Импульс паузы (I_d , t_n)	Схема провара
Непровар стыка (А)			
Нормальное формирование (С)			
Прожог (чрезмерное проплавление) (В)			

Рисунок 10 – Определение качества сварки по идентификации АЧХ колебаний сварочной ванны в периоды импульса и паузы в г-м цикле сварки [Determination of the quality of welding by identifying the frequency response of the welding pool oscillations during periods of impulse and pause in the welding cycle]

Частотный анализ положения пика АЧХ колебаний сварочной ванны в период действия импульса и паузы на каждом i -м цикле сварки в соответствии с таблицей качества сварки (рис. 10) позволяет формировать корректирующий сигнал управления по току $I_{ки}^i$ сварочного импульса [11]. Определенные значения $I_{ки}^i$ используют для стабилизации глубины проплавления стыка при действии в процессе сварки технологических возмущений [12, 13].

Алгоритм работы компьютерной системы управления в реальном времени (за каждый цикл сварки) приведен на рисунке 11.

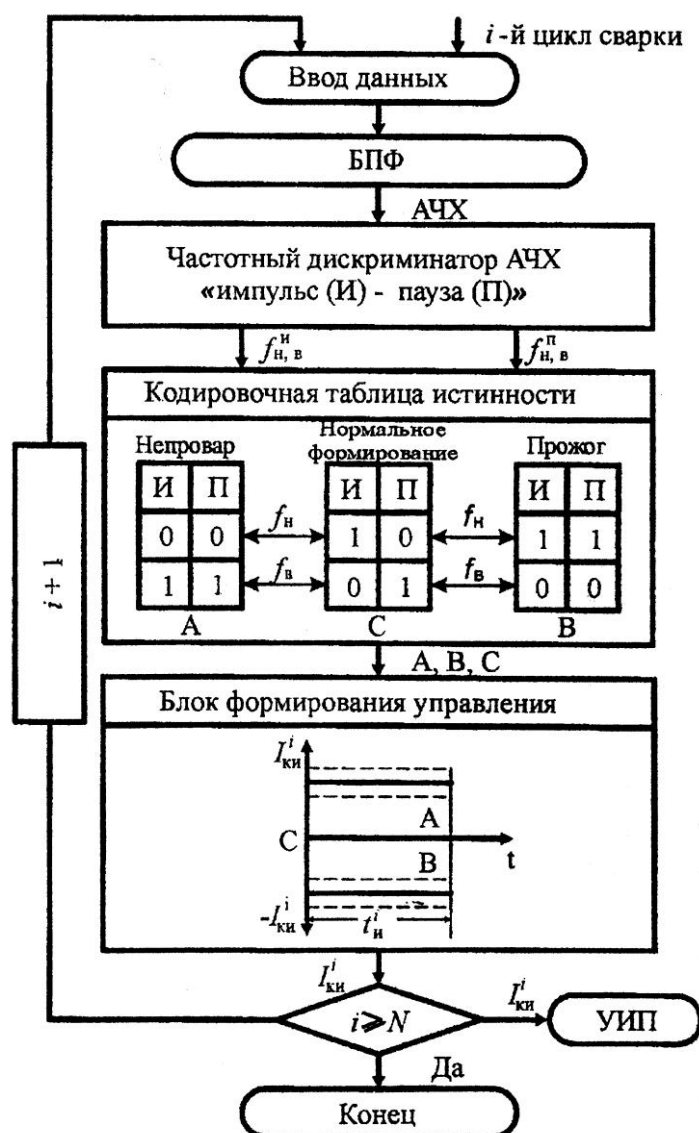


Рисунок 11 – Алгоритм обработки данных в компьютерной системе управления проплавлением
[Algorithm of data processing in computer control system of penetration]

Таким образом, по результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований предложены методы и алгоритмы построения систем автоматического управления процессом аргонодуговой сварки, в основу которых заложена зависимость спектра колебаний сварочной ванны с величиной проплавления свариваемого изделия. Система управления может быть рекомендована при производстве конструкций ответственного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гладков, Э.А.* Описание динамических процессов в сварочной ванне при вариации действующей нагрузки [Текст] / Э.А. Гладков, И.А. Гуслистов, А.В. Сас // Сварочное производство. – 1974. – № 4. – С. 11-13.
2. *Ишанин, Г.Г.* Источники и приемники излучения [Текст] / Г.Г. Ишанин, Э.Д. Панков, А.Л. Андреев и др. – Санкт-Петербург : Политехника, 1991. – 240 с.
3. *Гуслистов, И.А.* Устройство для контроля величины проплавления при сварке нержавеющей труб на станах АДС / И.А. Гуслистов, Э.А. Гладков, Е.М. Кричевский [и др.] // Сварочное производство. – 1973. – № 2. – С. 46-47.
4. *Ширковский, Н.А.* Адаптивная АСУ процесса аргонодуговой сварки труб [Текст] / Н.А. Ширковский, Э.А. Гладков, О.Н. Киселев [и др.] // Сварочное производство. – 1986. – №1. – С. 1-3.
5. *Гладков, Э.А.* Комплекс технических средств и оценка эффективности функционирования АСУ процесса аргонодуговой сварки труб [Текст] / Э.А. Гладков, Н.А. Ширковский, О.Н. Киселев [и др.] // Сварочное производство. – 1989. – №11. – С. 3-5.
6. *Гладков, Э.А.* Датчик величины проплавления при сварке трубчатых изделий [Текст] / Э.А. Гладков, Р.А. Перковский, О.Н. Киселев [и др.] // Перспективные пути развития сварки и контроля. Сварка и контроль 2001 : Тез. докл. всерос. науч.-техн. конф. – Воронеж, 2001 – 34 с.
7. *Смилянский, Г.Л.* Справочник проектировщика АСУ ТП [Текст] / Г.Л. Смилянский, Л.З. Амлинский, В.Я. Баранов [и др.] ; под ред. Г.Л. Смилянского. – Москва : Машиностроение, 1983. – 527 с.
8. *Виноградов, В.А.* Исследование оптического излучения сварочной дуги в аргоне [Текст] / В.А. Виноградов, Е.И. Романенков // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Сварочное производство. – 1977. – Вып. 3. – С. 184-190.
9. *Виноградов, В.А.* Возможность контроля и регулирования энерговложения в изделие при сварке концентрированными источниками нагрева с помощью оптических методов [Текст] // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Сварочное производство. – 1982. – Вып. 3. – С. 91-94.
10. *Поскачей, А.А.* Оптико-электронные системы измерения температуры [Текст] / А.А. Поскачей, Е.П. Чубаров. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 248 с.
11. *Watkins, P.V.C., Collier, R., Harvey, D.* Pulsed arc TIG Welding. Welding Review International. 1993. Vol. 62. N 2. P. 29-32.
12. *Chin, W., Chin, B.* Monitoring joint penetration using infrared sensing techniques. Welding Journal. 1990. Vol. 69. N 4. P. 181-185.
13. *Salter, R., Deam, R.* A practical front face penetration control system for TIG welding. Automated and Robotic Welding. 1987 Vol. 60. N 11. P. 145-156.

REFERENCES

- [1] Gladkov E.A., Guslistov I.A., Sas A.V. Opisanie dinamicheskikh processov v svarochnoy vanne pri variacii dejstvuyushchej na gruzki [Description of Dynamic Processes in the Weld Pool with Variations in the Current Load]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding production]. 1974. № 4. P. 11-13 (in Russian).
- [2] Ishanin G.G., Pankov E.D., Andreev A.L. Istochniki i priemniki izlucheniya [Radiation Sources and Receivers]. SPb Politehnika [St. Petersburg: Polytechnic]. 1991 (in Russian).
- [3] Guslistov I.A., Gladkov E.A., Krichevskij E.M. Ustrojstvo dlya kontrolya velichiny proplavleniya pri svarke nerzhavayushchih trub na stanah ADS [A Device for Controlling the Magnitude of Penetration in Welding of Stainless Steel Tubes at Mills ADS]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding Production]. 1973. №2. P. 46-47 (in Russian).
- [4] Shirkovskij N.A., Gladkov E.A., Kiselev O.N. Adaptivnaya ASU processa argonodugovoj svarki trub [Adaptive Automatic Control System of the Process Of Argon-Arc Welding Pipe]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding Production]. 1986. №11. P. 1-3 (in Russian).
- [5] Gladkov E.A., Shirkovskij, Kiselev O.N. i dr. Kompleks tekhnicheskikh sredstv i ocenka ehffektivnosti funkcionirovaniya N.A. ASU processa argonodugovoj svarki trub [Set of Technical Tools and Evaluation of Efficiency of Functioning of Automated Control System of the Process of Argon-Arc Welding Pipe]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding Production]. 1989. №11 P. 3-5 (in Russian).
- [6] Gladkov E.A., Perkovskij R.A., Kiselev O.N. Datchik velichiny proplavleniya pri svarke

- trubchatykh izdelij [Sensor of Penetration Value at Welding of Tubular Products]. Perspektivnye puti razvitiya svarki i kontrolya Svarka i control 2001. Tez dokl Vseros nauch-tekhnikonf [Perspective Ways of Development of Welding and Control. Welding and Control 2001 : abstracts of All-Russian Science Technical Conference]. Voronezh. 2001. P. 34 (in Russian).
- [7] Smilyanskij G.L., Amlinskij L.Z., Baranov V.Ya. Spravochnik proektirovshchika ASU TP [Handbook of the APCD designer]. Pod red. G. L. Smilyanskogo. M: Mashinostroenie. 1983. P. 527 (in Russian).
- [8] Vinogradov V.A., Romanenkov E.I. Issledovanie opticheskogo izlucheniya svarочноj dugi v argone [Investigation of Optical Radiation of Welding Arc in Argon]. Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Ser Svarочноe proizvodstvo [Issues of Nuclear Science And Technology. Welding Production]. 1977. Vol. №3. P. 184-190 (in Russian).
- [9] Vinogradov V.A. Vozmozhnost kontrolya i regulirovaniya ehnergo vlozheniya v izdelie pri svarke koncentrirovannymi istochnikami nagreva s pomoshchyu opticheskikh metodov [The Ability to Control and Regulate the Energy Input into the Product When Welding with Concentrated Heating Sources Using Optical Methods]. Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Ser Svarочноe proizvodstvo [Issues of Nuclear Science And Technology. Welding Production]. 1982. Vol. 3. P. 91-94 (in Russian).
- [10] Poskachej A.A., Chubarov E.P. Optiko-ehlektronnye sistemy izmereniya temperatury [Optical-Electronic System for Measuring Temperature]. 2-e izd. Pererab. i dop. Moskva: Energoatomizdat [Moscow: Energoatomizdat]. 1988. P. 248 (in Russian).
- [11] Watkins P.V.C., Collier R., Harvey D. Pulsed arc TIG Welding. Welding Review International. 1993. Vol. 62. N 2. P. 29-32.
- [12] Chin W., Chin B. Monitoring joint penetration using infrared sensing techniques. Welding Journal. 1990. Vol. 69. N 4. P. 181-185.
- [13] Salter R., Deam R. A practical front face penetration control system for TIG welding. Automated and Robotic Welding. 1987 Vol. 60. N 11. P. 145-156.

Monitoring and Regulation System of Penetration Depth at Argon-Arc Welding of Important Products on Welding Pool Oscillation

Eh.A. Gladkov^{*1}, N.A. Simakova^{2}, R.A. Perkovskij^{*3}, T.V. Brodyagina^{***4}**

** Bauman Moscow State Technical University (MSTU), 2nd Baumanskaya St., 5, Moscow, Russia, 105005*

¹ ORCID iD: 0000-0101-6610-8725

WoS Researcher ID: J-6791-2017

e-mail: 123777@bk.ru

³ ORCID iD: 0000-0002-7512-4687

WoS Researcher ID: J-7170-2017

e-mail: proman@bmstu.ru

*** Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI", Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia, 347360*

² ORCID iD: 0000-0002-8599-6008

WoS Researcher ID: Y-3656-2018

e-mail: simnataalex@gmail.com

**** Certification Center of Urban Farming (TSGH), Perevedenovsky lane, 13, building 15, Moscow, 105082*

⁴ ORCID iD: 0000-0002-8609-3687

WoS Researcher ID: P-2357-20

e-mail: ac-mosgaz@yandex.ru

Abstract – The article presents the results of studies carried out to build an automatic system for regulating the depth of penetration during argon-arc welding using signals of welding pool oscillations. Methods of control and algorithms for controlling the process of argon-arc welding of critical structures by welding pool oscillations and extraction of the oscillation spectrum are proposed.

Keywords: welding pool, the amount of penetration, optical sensor, welding quality.

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 528.48

**ПРИНЦИП РАСЧЕТА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ
ВЫПОЛНЕНИИ КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ**

© 2019 Ю.И. Пимшин*, Ю.В. Заяров*, Г.А. Науменко**

*Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета (МИФИ), Волгодонск, Россия

**Донской государственный технический университет (ДГТУ), Ростов-на-Дону, Россия

В работе рассмотрена методика определения точности геодезических измерений в процессе мониторинга технического состояния объектов, при условии надежного определения значений деформационных характеристик в пределах нормативных допустимых величин. При этом предложено коэффициент обеспечения точности рассчитывать исходя из значения величины приближения к предельной величине допустимой деформации. Таким образом, определяемая величина текущей деформации не превышает ее предельного значения.

Ключевые слова: деформация, измерение, ошибка измерения, измеряемый параметр, физико-механические свойства, допуск.

Поступила в редакцию 26.10.2018

После доработки 19.11.2018

Принята к публикации 11.12.2018

Рассматривая геометрические признаки $\varphi'_{(геом)}$ деформационных процессов с точки зрения порядка их назначения.

Проектирования инженерных объектов предполагает следующую последовательность назначения геометрических характеристик разрабатываемого объекта [1-2]. На первом этапе проектирования назначаются номинальные расчетные геометрические характеристики, они определяют размеры $\varphi'_{(разм)}$, форму $\varphi'_{(форма)}$, взаимное расположение $\varphi'_{(взаим/расп)}$ элементов разрабатываемого объекта.

$$\varphi'_{(геом)} = \Omega[\varphi'_{(разм)}; \varphi'_{(форма)}; \varphi'_{(взаим/расп)}] \quad (1)$$

Данные параметры задаются абсолютными значениями и определяют вид и габариты проектируемого объекта. На втором этапе назначают проектные геометрические характеристики $\varphi''_{(геом)}$ разрабатываемого объекта, они определяют возможные работоспособные пределы изготовления параметров элементов или их монтажа:

$$\varphi''_{(геом)} = \Omega[\varphi''_{(разм)}(l_1 \pm \Delta l_1; l_2 \pm \Delta l_2; \dots; l_n \pm \Delta l_n); \varphi''_{(форма)}(x_1 \pm \Delta x_1; x_2 \pm \Delta x_2; \dots; x_n \pm \Delta x_n); \varphi''_{(взаим/расп)}(\alpha_1 \pm \Delta \alpha_1; \alpha_2 \pm \Delta \alpha_2; \dots; \alpha_n \pm \Delta \alpha_n)]. \quad (2)$$

где $l_1; l_2; \dots; l_n$ – номинальные параметры, определяющие размеры элементов объекта;
 $\pm \Delta l_1; \pm \Delta l_2; \dots; \pm \Delta l_n$ – допуски на изготовление размеров элементов объекта;
 $x_1; x_2; \dots; x_n$ – номинальные параметры, определяющие форму элементов объекта;

$\pm\Delta x_1; \pm\Delta x_2; \dots; \pm\Delta x_n$ – допуски на изготовление форм элементов объекта;

$\alpha_1; \alpha_2; \dots; \alpha_n$ – номинальные параметры, определяющие взаимное расположение элементов объекта;

$\pm\Delta\alpha_1; \pm\Delta\alpha_2; \dots; \pm\Delta\alpha_n$ – допуски на изготовление параметров взаимного расположения элементов объекта.

При возведении объекта осуществляют формирование его геометрических параметров. Порядок выполнения формирования геометрических характеристик объекта заключается в том, что, во-первых, осуществляют вынос в натуру заданных параметров. При этом маркируют их положение, которое определяет размеры, форму и взаимное расположение элементов объекта. Во-вторых, осуществляют их возведение и в общем случае на данном этапе осуществляют пошаговый контроль сформированных геометрических параметров. Реализация всех процедур, связанных с выносом в натуру и контролем геометрических параметров, обеспечивается путем использования геодезических методов измерений, точность m_l , m_x , m_α выполнения которых определяется применением коэффициентов обеспечения точности C_i :

$$\begin{aligned} m_l &= C_1 \cdot \Delta l_i; \\ m_x &= C_2 \cdot \Delta x_i; \\ m_\alpha &= C_3 \cdot \Delta \alpha_i. \end{aligned} \quad (3)$$

Коэффициент обеспечения точности C_i задается либо нормативными документами, например, на общестроительные работы, либо проектной документацией, например, на специальные работы [3-10].

В процессе выполнения контрольно измерительных работ определяются геометрические характеристики объекта, при этом качественными измерения считаются тогда, когда фактические ошибки измерений $\pm m^{(ф)}$ не превосходят расчетных $\pm m$. Фактические ошибки измерений $\pm m^{(ф)}$ определяются либо по результатам уравнивания геодезических построений, или по результатам многократных измерений, или по результатам предварительных исследований методов измерений.

Найденные фактические геометрические параметры $\varphi^{(факт)}_{(геом)}$ определяют качество формирования геометрических характеристик объекта

$$\begin{aligned} \varphi^{(факт)}_{(геом)} &= \Omega \left[\varphi^{(факт)}_{(разм)} \left(l_1^{(ф)} \pm m_{l_1}^{(ф)}; l_2^{(ф)} \pm m_{l_2}^{(ф)}; \dots; l_n^{(ф)} \pm m_{l_n}^{(ф)} \right); \right. \\ &\quad \left. \varphi^{(факт)}_{(форма)} \left(x_1^{(ф)} \pm m_{x_1}^{(ф)}; x_2^{(ф)} \pm m_{x_2}^{(ф)}; \dots; x_n^{(ф)} \pm m_{x_n}^{(ф)} \right); \right. \\ &\quad \left. \varphi^{(факт)}_{(взаим\ расп)} \left(\alpha_1^{(ф)} \pm m_{\alpha_1}^{(ф)}; \alpha_2^{(ф)} \pm m_{\alpha_2}^{(ф)}; \dots; \alpha_n^{(ф)} \pm m_{\alpha_n}^{(ф)} \right) \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Если величины $l_i^{(ф)}$, $x_i^{(ф)}$, $\alpha_i^{(ф)}$ близки к предельно допустимым $l_i \pm \Delta l_i$, $x_i \pm \Delta x_i$, $\alpha_i \pm \Delta \alpha_i$ в этом случае из-за влияния фактических ошибок измерений $m_{li}^{(ф)}$, $m_{xi}^{(ф)}$, $m_{\alpha i}^{(ф)}$ возможны ситуации, связанные:

- с признанием качественными геометрических параметров некачественных;
- с признанием некачественными геометрическими параметрами качественных (рис. 1).

Выявленные некачественные геометрические параметры отдельных элементов исследуемого объекта могут влиять на его собираемость, на эксплуатационную надежность, на эстетичность архитектурного решения. Вовремя принятое строительное

решение может обеспечить либо устранение данного негативного факта, либо компенсировать (полностью или частично) его влияние.

В процессе эксплуатации объекта осуществляют текущую регистрацию (наблюдение, мониторинг) его геометрических характеристик. При этом следует иметь ввиду то, что на стадии проектирования строительных объектов, для формирования его физических и механических характеристик, широко применяют методику проектирования по предельным его состояниям. То есть определяются номинальные параметры объекта и граничные расчетные критические пределы, в диапазоне которых объект сохраняет работоспособность или целостность.

$$\varphi_{4(физ/мех)}^{(пред)} = \varphi_{4(физ/мех)} \pm \Delta\varphi_{4(физ/мех)} \quad (5)$$

где $\Delta\varphi_{4(физ/мех)}$ – предельные значения отклонений физико-механических параметров от номинальных значений.

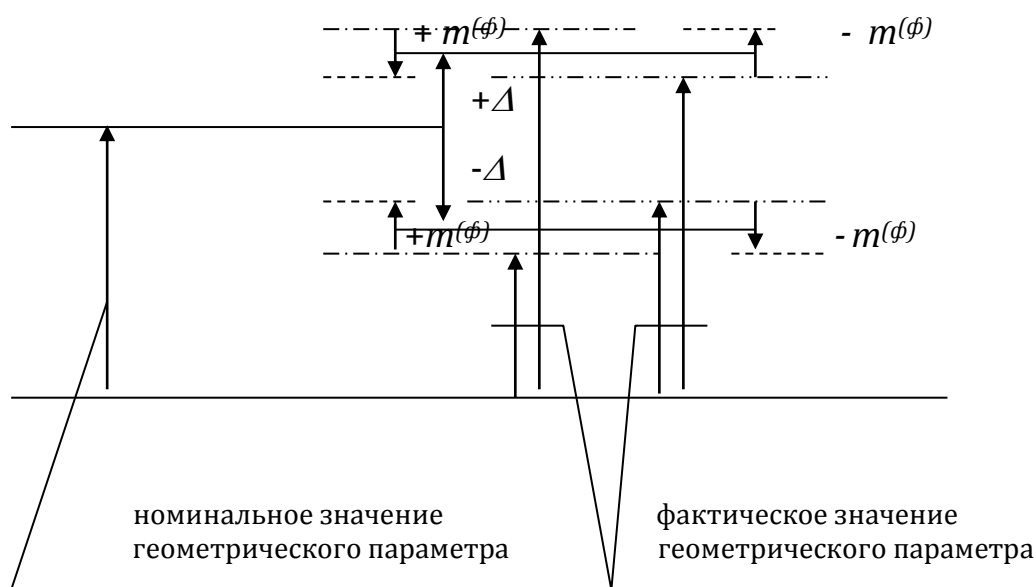


Рисунок 1 – Схема влияния ошибки измерений на достоверность результата измерений [Diagram of the effect of measurement error on the measurement result accuracy]

Параметры объекта и граничные расчетные критические пределы, в диапазоне которых объект сохраняет работоспособность или целостность.

$$\varphi_{4(физ/мех)}^{(пред)} = \varphi_{4(физ/мех)} \pm \Delta\varphi_{4(физ/мех)} \quad (5)$$

где $\Delta\varphi_{4(физ/мех)}$ – предельные значения отклонений физико-механических параметров от номинальных значений.

Превышение указанных критических пределов приводит к разрушению объекта.

В практике проектирования не допускают назначение параметров объекта с использованием предельных состояний. Всегда предельные значения отклонений $\Delta\varphi_{4(физ/мех)}$, с целью повышения эксплуатационной надежности проектируемого объекта, уменьшают путем введения коэффициента надежности $C_{i(надежн)}$, при этом

$C_{i(надежн)} < 1$. Таким образом, проектные характеристики объекта определяются:

$$\varphi_{4(физ/мех)}^{(проект)} = \varphi_{4(физ/мех)} \pm (C_{i(надежн)} \cdot \Delta\varphi_{4(физ/мех)}). \quad (6)$$

В процессе возведения объекта, реализацией строительных технологий, обеспечивается формирование его физико-механических свойств $\varphi_{4(физ/мех)}^{(факт)}$.

$$\varphi_{4(физ/мех)}^{(факт)} = \varphi_{4(физ/мех)} \pm \Delta\varphi_{4(физ/мех)}^{(факт)} \quad (7)$$

с соблюдением условия $(C_{i(надежн)} \cdot \Delta\varphi_{4(физ/мех)} \geq \Delta\varphi_{4(физ/мех)}^{(факт)})$.

В процессе эксплуатации объекта на него оказывают влияние нагрузки и воздействия природного и техногенного характера $\Delta'\varphi_{4(физ/мех)}^{(экспл/факт)}$. Причем, данное воздействие, как правило, имеет негативный характер и неизбежно приводит к изменению (в сторону уменьшения) физико-механических свойств объекта:

$$\varphi_{4(физ/мех)}^{(экспл/факт)} = \varphi_{4(физ/мех)}^{(факт)} - \Delta'\varphi_{4(физ/мех)}^{(экспл/факт)}. \quad (8)$$

Учитывая выше сказанное, еще на стадии проектирования, устанавливаются допустимые эксплуатационные пределы изменения физико-механических свойств объекта:

$$\varphi_{4(физ/мех)}^{(экспл)} = \varphi_{4(физ/мех)}^{(факт)} - \Delta\varphi_{4(физ/мех)}^{(экспл)}. \quad (9)$$

При этом эксплуатационная надежность объекта обеспечивается при условии $\Delta\varphi_{4(физ/мех)}^{(экспл)} > \Delta'\varphi_{4(физ/мех)}^{(экспл/факт)}$. В случае если $\Delta\varphi_{4(физ/мех)}^{(экспл)} < \Delta'\varphi_{4(физ/мех)}^{(экспл/факт)}$ объект считается аварийным.

В процессе эксплуатации объекта выполняется мониторинг его текущего технического состояния с целью определения степени влияния негативных нагрузок на его характеристики и недопущения его перехода в аварийное состояние путем принятия своевременных мер восстановления эксплуатационной надежности. Для оценки текущего технического состояния объекта контролируют его физические, механические и геометрические параметры. Анализ их изменения обеспечивает формирования представления о состоянии объекта. Определение каждой из названных групп параметров осуществляется путем реализации соответствующих программ и методик с применением необходимых систем контроля.

Реализация процедуры контроля геометрических параметров на стадии эксплуатации объекта имеет существенные отличия от методики контроля такого же рода параметров при возведении объекта. Если на стадии строительства объекта геометрические параметры определяются (в статическом состоянии) и оценивается их соответствие проектным значениям, то на стадии эксплуатации оценивается их изменение (динамические свойства). Реализация данной задачи осуществляется путем повторных измерений геометрических характеристик и их сравнительный анализ, на основе которого строится зависимость изменения геометрических параметров во

времени, прогнозируется состояние геометрических характеристик на заданном предстоящем временном интервале, на основе которого прогнозируется значение приближения текущих геометрических характеристик к допустимым эксплуатационным параметрам. При этом точность геодезических измерений зависит от межциклового временного интервала и от значений приближения текущих геометрических характеристик к допустимым эксплуатационным параметрам. Так для больших временных интервалов при однородной (одинаковой) динамике геометрических характеристик формируются их большие изменения. Как следствие этого для регистрации больших значений изменений допускаются большие ошибки измерений. При равных межцикловых интервалах точность геодезических измерений назначается исходя из значений приближения текущих геометрических характеристик к допустимым эксплуатационным параметрам путем применения коэффициента обеспечения точности C_i также зависящего от названных значений. При этом в первом цикле мониторинга геометрических параметров определяют точность геодезических измерений по стандартной методике:

$$m_{1(geod)} = C_1 \cdot \Delta\varphi_{(физ/мех)}^{(эксpl)},$$

где C_1 – коэффициент обеспечения точности, задается либо нормативными документами, например, на общестроительные работы, либо проектной документацией, например, на специальные работы.

В процессе осуществления последующих циклов работ контролируют величины фактических геометрических параметров совместно с соответствующими фактическими ошибками измерений:

$$\left[\left(\varphi_{(геом)}^{(эксpl)} + \Delta\varphi_{(геом)}^{(эксpl)} \right) - \left(\varphi_{(геом)}^{(эксpl/факт)} + m_{i(geod)}^{(ф)} \right) \right] \leq 0 \quad (10)$$

Если данное неравенство для текущего цикла i выполняется, то результаты измерений, полученные в нем, не принимаются в обработку. Вычисляется C_i :

$$C_i = \left[\left(\varphi_{(геом)}^{(эксpl)} + \Delta\varphi_{(геом)}^{(эксpl)} \right) - \varphi_{(геом)}^{(эксpl/факт)} \right] / \Delta\varphi_{(геом)}^{(эксpl)}. \quad (11)$$

Затем определяют точность геодезических измерений в i цикле:

$$m_{i(geod)} = C_i \left[\left(\varphi_{(геом)}^{(эксpl)} + \Delta\varphi_{(геом)}^{(эксpl)} \right) - \varphi_{(геом)}^{(эксpl/факт)} \right]. \quad (12)$$

Далее геодезические работы в i цикле повторяются заново и продолжают осуществлять последующие за ним циклы до выполнения условия (10) (рис. 2).

Реализация описанной методики обеспечивает определение текущего состояния геометрических параметров объекта при условии, что его состояние не перейдет к условию $\Delta\varphi_{(физ/мех)}^{(эксpl)} < \Delta'\varphi_{(физ/мех)}^{(эксpl/факт)}$, характеризующему аварийное состояние. При этом следует понимать то, что геодезические технологии контроля позволяют определить техническое состояние объекта, но не восстановить его до эксплуатационно пригодного. Геодезические данные являются информацией для своевременного планирования и принятия соответствующих строительных решений.

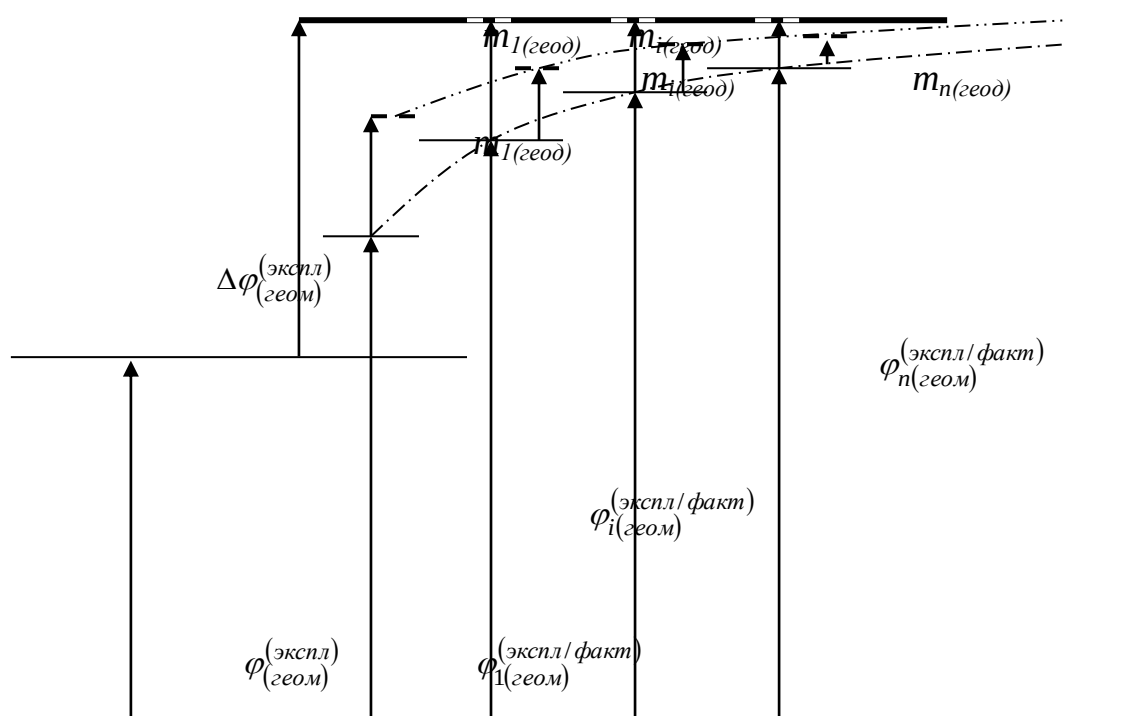


Рисунок 2 – Схема определения точности геодезических измерений исходя из значений приближения текущих геометрических характеристик к допустимым эксплуатационным параметрам [Scheme for determining the accuracy of geodesic measurements based on the values of the approximation of the current geometric characteristics to the permissible operating parameters]

При проектировании мониторинга необходимо оценить значимость связей, зоны их проявления, ожидаемые величины параметров, отнесенных к ним. Это можно осуществить на основе анализа ранее полученного (имеющегося) опыта выполнения аналогичных исследований, математического моделирования процесса и т.д. На основе данной априорной информации формируется программа мониторинга, результатом которого является информация о текущем состоянии объекта, т.е. его эксплуатационной надежности, оценивается остаточный ресурс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Столбов, Ю.В. Допуски и средства проверки качества строительно-монтажных работ [Текст] / Ю.В. Столбов // Геодезические методы контроля точности в строительстве. – Куйбышев : Куйбышевский гос. ун-т. – 1983. – С. 63-65.
2. Справочник по геодезическим работам в строительно-монтажном производстве [Текст] / Под ред. Ю.В. Полищук – Москва : Недра, 1990. – 336 с.
3. Абаджи, К.И. Контроль взаимного расположения поверхностей деталей машин [Текст] / К.И. Абаджи, В.И. Дружинин, В.И. Исаев. – Ленинград : Машгиз, 1962. – 116 с.
4. ГОСТ 21779-76 Система обеспечения точности геометрических параметров. Технологические допуски геометрических параметров. – 1976. – 11 с. URL : <http://gostt.ru/Index/22/22039.htm> (дата обращения: 10.08.2018)
5. Голендухин, М.А. Обоснование норм точности на геодезические разбивочные работы и контрольные измерения при строительстве и эксплуатации промышленных сооружений: автореф. дис. канд. тех. наук по спец. 05.24.01 [Текст] / М.А. Голендухин. – Новосибирск : НИСИ, 1974. – 23 с.
6. Жуков, В.Н. Нормирование точности геодезических измерений при возведении сооружений, монтаже оборудования и контроле за их состоянием [Текст] / В.Н. Жуков // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – Вып. 4. – 1983. – С. 28-35.
7. Бородко, А.В. Развитие системы геодезического обеспечения в современных условиях [Текст] / А.В. Бородко, Н.Л. Макаренко, Г.В. Демьянов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – № 10. – 2003. – С. 7-13.

8. Ключин, Е.Б. Инженерная геодезия [Текст] / Е.Б. Ключин, М.И. Киселев, Д.Ш. Михелев, В.Д. Фельдман. – Москва : Высшая школа, 2002. – 480 с.
9. Ключин, Е.Б. Создание плановой разбивочной основы на монтажном горизонте при строительстве зданий повышенной этажности [Текст] / Е.Б. Ключин, Заки Мохамед Зейдан Эль-Шейха, Е.П. Власенко // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – № 5. – 2009. – С. 48-54.
10. Ямбаев, Х.К. Разработка и внедрение высокоточных геодезических измерений в проектирование и эксплуатацию уникальных инженерных сооружений России [Текст] / Х.К. Ямбаев, Г.Е. Рязанцев // Международная научно-техническая конференция, посвященная 225-летию МИИГАиК. – Москва, 2004. – 126 с.

REFERENCES

- [1] Stolbov Yu.V. Dopuski i sredstva proverki kachestva stroitel'no-montazhnyh rabot [Tolerances and Means of Quality Control of Construction Works]. Geodezicheskie metody kontrolya tochnosti v stroitel'stve [Geophysical Methods of Accuracy Control in Construction]. Kuibyshev: Kuibyshev state UN-T. 1983. P. 63-65 (in Russian).
- [2] Spravochnik po geodezicheskim rabotam v stroitel'no-montazhnom proizvodstve [Reference for Geodesic Works in the Construction Trade]. Ed. by Y.V. Polishchuk. Moscow: Nedra. 1990. 336 p. (in Russian).
- [3] Abadzhi K.I., Druzhinin V.I., Isaev V.I. Kontrol' vzaimnogo raspolozheniya poverhnostej detalej mashin [Control of the Mutual Position of Machine Part Surfaces]. – Leningrad: Mashgiz. 1962. 116 p. (in Russian)
- [4] GOST 21779-76 Sistema obespecheniya tochnosti geometricheskikh parametrov. Tekhnologicheskie dopuski geometricheskikh parametrov [The system of Ensuring the Accuracy of Geometric Parameters. Technological Tolerances of Geometrical Parameters]. 1976. 11 p. URL : <http://gostt.ru/Index/22/22039.htm> (in Russian).
- [5] Golendukhin M.A. Obosnovanie norm tochnosti na geodezicheskie razbivochnye raboty i kontrol'nye izmereniya pri stroitel'stve i ekspluatatsii promyshlennyh sooruzhenij [Justification of Accuracy Standards for Geodetic Center Work and Control Measurements in the Construction and Operation of Industrial Facilities. Abstract. on competition of a scientific degree. Academic Step. Ph. D. in engineering. 05.24.01. Novosibirsk, NISI]. 1974. 23 p. (in Russian).
- [6] Zhukov V.N. Normirovanie tochnosti geodezicheskikh izmerenij pri vozvedenii sooruzhenij, montazhe oborudovaniya i kontrole za ih sostoyaniem [Regulation of the Accuracy of Geodesic Measurements in the Construction of Facilities, Installation of Equipment and Monitoring of their Condition]. Izv. vuzov. Geodeziya i aerofotosemka. WPI [Higher Educational. Geodesy and Aerial Photography]. Issue.4. 1983. P. 28-35 (in Russian).
- [7] Borodko A.B., Makarenko H.L., Demyanov G.V. Razvitie sistemy geodezicheskogo obespecheniya v sovremennykh usloviyah. [Development of the Geodesic Support System in Modern Conditions]. Moskva: Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotosemka [Moscow: University News. Geodesy and Aerial Photography]. № 10. 2003. P. 7-13 (in Russian)
- [8] Klyushin E.B., Kiselev M.I., Mikhalev D.S., Feldman V.D. Mikhalev D.Sh. Inzhenernaya geodeziya [Engineering Geodesy]. Moskva: Vysshaya Shkola [Moscow: Higher school]. 2002. 480 p. (in Russian).
- [9] Klyushin E.B., Zaki Mohamed Zeidan El-Sheikha, Vlasenko E.P. Sozdanie planovoj razbivochnoj osnovy na montazhnom gorizonte pri stroitel'stve zdaniy povyshennoj etazhnosti [Creation of Planned Center Basis on the Installation Horizon in the Construction of High-Rise Buildings]. Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotosemka [University News. Geodesy and Aerial Photography]. № 6. 2009. P. 48-54 (in Russian).
- [10] Yambaev H.K., Ryazantsev G.E. Razrabotka i vnedrenie vysokotochnykh geodezicheskikh izmerenij v proektirovanie i ekspluatatsiyu unikal'nykh inzhenernykh sooruzhenij Rossii [Development and Implementation of High-Precision Geodetic Measurements in the Design and Operation of Unique Engineering Structures of Russia]. Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya, posvyashchennaya 225-letiyu MIIGAiK [International Scientific and Technical Conference Dedicated to the 225th Anniversary of MIIGAiK]. Moscow. 2004. 126 p. (in Russian).

Principle of Accuracy Calculation of Measurements during Deformation Process Monitoring

Yu.I. Pimshin *¹, Yu.V. Zayrov *², G.A. Naumenko **³

**Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University “MEPhI”,
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

¹ORCID iD: 0000-0001-6610-8725

WoS Researcher ID: J-6791-2017

e-mail: YIPimshin@mephi.ru

²ORCID iD: 0000-0003-3353-8037

WoS Researcher ID: G-7342-2019

e-mail: YVZayarov@mephi.ru

*** Don State Technical University, Gagarin square 1, Rostov-on-Don, Russia, 344000*

³ORCID iD: 0000-0002-7512-4687

WoS Researcher ID: J-7170-2017

e-mail: geodez@aanet.ru

Abstract – The paper considers the method of determining the accuracy of geodesic measurements in the process of monitoring the technical condition of objects, provided the reliable determination of the deformation characteristics values within the normative permissible values.

Keywords: deformation, measurement, measurement error, measured parameter, physical and mechanical properties, tolerance.

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.315.592

**ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ НА ОСНОВЕ
НАНОСТРУКТУР GaInAs, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ
ИОННО-ЛУЧЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ**

© 2019 И.А. Сысоев*, Д.А. Гусев**, А.Е. Дембицкий**, А.Ю. Смолин**, В.Ф. Катаев**

* Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Северо-Кавказский федеральный университет», Ставрополь, Россия

** Волгодонский инженерно-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, Волгодонск, Россия

Экспериментально показана возможность формирования методом ионно-лучевого осаждения квантовых точек на основе трехкомпонентных твердых растворов GaInAs различных составов на поверхность GaAs. Рассмотрены особенности технологии ионно-лучевого осаждения. Определены оптимальные соотношения компонентов твердого раствора GaInAs, при котором квантовые точки характеризуются наименьшими размерами и наибольшей плотностью. Представлены результаты исследования спектров фотолюминесценции, морфологии поверхности полученных наноструктур. Полученные результаты могут представлять практический интерес для применения в многопереходных солнечных элементах с целью повышения их КПД.

Ключевые слова: солнечные элементы, наноразмерные структуры, многокомпонентные твердые растворы, ионно-лучевое осаждение, технология, материалы для фотоэлементов.

Поступила в редакцию 18.01.2019

После доработки 19.02.2019

Принята к публикации 21.02.2019

ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции в энергетике стимулируют довольно высокий рост интереса к альтернативным источникам энергии. Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), или солнечные элементы, являются наиболее перспективным, экологически чистым решением вопроса создания альтернативных источников энергии, так как они непосредственно преобразуют солнечное излучение в электрическую энергию в отличие от других существующих источников энергии [1].

В настоящий момент перспективы развития солнечной энергетики связаны с полупроводниковыми гетероструктурами на основе соединений и твердых растворов A^{III}B^V [1]. Это обусловлено фотоэлектрическими, оптическими, электрофизическими параметрами и характеристиками данных материалов. Важным преимуществом ФЭП на основе гетероструктур по сравнению со структурами на основе кремния являются больший коэффициент полезного действия (кпд), повышенная температурная и радиационная стабильность, а также высокая эффективность преобразования концентрированного солнечного излучения [2]. Однако следует отметить, что существует ряд факторов, которые ограничивают КПД данных ФЭП. В первую очередь к ним относятся потери на термализацию [3].

Одним из основных подходов, позволяющих частично устранить указанную проблему, основывается на последовательном соединении однопереходных солнечных элементов с различной шириной запрещенной зоны через коммутационные туннельные

диоды в многопереходные (МП) гетероструктурные ФЭП [3]. Однако увеличение количества элементов каскада приводит к усложнению конструкции ФЭП, увеличению числа гетерограниц, что влечет за собой возрастание внутренних потерь и, в частности, увеличение последовательного сопротивления ФЭП [4]. Кроме того, для создания высокоэффективных многопереходных солнечных элементов существует ограниченное количество материалов, обеспечивающих согласование постоянных кристаллических решеток.

Современный подход к решению данной проблемы, основан на применении полупроводниковых структур с самоорганизующимися квантовыми точками (КТ). Благодаря дискретному энергетическому спектру КТ появляется возможность решить проблему потерь на термализацию. Управляя размерами, формой КТ и составом матрицы (слой, окружающий КТ), можно контролируемо модифицировать край зоны поглощения дополнительного перехода на КТ, что позволит расширить спектральный диапазон чувствительности и увеличить фототок ФЭП на КТ [5].

Одними из наиболее эффективных на сегодняшний день являются трехпереходные ФЭП на основе GaInP/GaInAs/Ge, так как на сегодняшний день они имеют наибольшее КПД преобразования солнечной энергии в электрическую [5]. Авторами работы [5] методом МПЭ были получены GaAs *p-i-n*-структуры для ФЭП на основе КТ InAs, величина тока короткого замыкания которых на 1%, по сравнению с GaAs – реперной структурой (структурой без внедрения КТ). Использование внедренных слоев КТ InAs в *i* – области вносит значительный вклад во внешнюю квантовую эффективность ФЭП, что также отражено в работе авторов [6], в которой были получены аналогичные результаты методом ионно-лучевого осаждения. В свою очередь внедрение КТ на основе трехкомпонентных твердых растворов $Ga_xIn_{1-x}As$ позволяет расширить диапазон чувствительности МП ФЭП вплоть до 1,3 мкм и, следовательно, увеличить КПД. В работе [7] авторы показали перспективность синтеза КТ GaInAs с “многомодальным” распределением по размерам, для которых характерна расширенная спектральная чувствительность, методом МОСГФЭ. В основе работы лежало исследование зависимости размеров КТ от состава, а также морфологии поверхности подложки.

Широко применяемые технологические методы МПЭ и МОСГФЭ для выращивания КТ на основе бинарных и многокомпонентных соединений и твердых растворов АІІІВV, давно и надежно зарекомендовали себя. Однако наряду с отработанностью технологии и несомненными преимуществами данные методы являются технически сложными и дорогостоящими, в связи с чем, в настоящее время широкое развитие получили альтернативные методы. К одним из таких относится ионно–лучевое осаждение (ИЛО), рассмотренное нами ранее в работах [8, 9].

Настоящая работа посвящена получению КТ на основе твердых растворов GaInAs различных составов методом ИЛО, исследованию влияния состава на размер КТ, а также исследованию их фотоэлектрических свойств.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследуемые образцы были получены методом ИЛО в режиме роста Странски – Крастанова. Конструкция установки и методика получения КТ подробнее рассмотрена нами ранее в работе [10]. В экспериментах использовались стандартные подложки арсенида галлия АГЧО (100) с концентрацией носителей заряда *n* – типа $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, диаметром – 35 мм.

В качестве исходных компонентов использовались Ga и InAs. Экспериментальные исследования проводились для следующих составов твердых растворов: 1) $Ga_{0,9}In_{0,1}As$, 2) $Ga_{0,7}In_{0,3}As$, 3) $Ga_{0,65}In_{0,35}As$, 4) $Ga_{0,76}In_{0,24}As$,

5) $\text{Ga}_{0,85}\text{In}_{0,15}\text{As}$.

Исходные компоненты взвешивались на высокоточных аналитических весах и смешивались в необходимых пропорциях. Полученная таким образом смесь компонентов измельчалась до порошкообразного состояния однородной фракции (размер зерен 0,2–0,3 мкм), затем тщательно перемешивалась и спрессовывалась. Подготовленные мишени GaInAs различных составов помещались в ячейки кассеты источника, ориентированные под углом 45° по отношению к подложке.

Для подложек GaAs проводилась стандартная предварительная подготовка, по завершению которой они закреплялись в ячейках кассеты, предназначенной для выращиваемых соединений. После установки распыляемых мишеней и осаждаемых подложек в ячейки технологических кассет, в ростовой камере ИЛО создавался вакуум (остаточное давление 5×10^{-4} Па).

Предварительно в каждой серии экспериментов проводилась очистка поверхности подложек сфокусированным ионным пучком аргона (рабочее давление 7×10^{-4} Па). Приведем параметры ионной очистки: время очистки – 30 мин; энергия ионов в пучке – 800 эВ; ток ионного пучка – 25 мА. По завершению процесса очистки, включался регулируемый резистивный нагреватель, при помощи которого устанавливалась необходимая температура осаждаемых подложек, распыляемая мишень определенного состава совмещалась с соответствующей подложкой GaAs и осуществлялся процесс ИЛО квантовых точек GaInAs.

Выращивание КТ InGaAs проводилось при следующих ростовых параметрах, определенных нами ранее в ходе предварительных экспериментов [10]: температура подложки – 550°C , время процесса осаждения составляло – 3 мин, энергия ионов в пучке – 1000 эВ, величина тока ионного пучка – 25 мА. На первом этапе экспериментальных исследований выращивались КТ гетероструктуры с «незакрытыми» слоями GaInAs/GaAs различных составов. Далее для исследования спектров фотолюминесценции, полученные КТ закрывались материалом матрицы GaAs. При этом каждая подложка с выращенными КТ различного состава совмещалась с распыляемой ячейкой, содержащей материал матричного слоя.

Приведем параметры осаждения материала матричного слоя GaAs: энергия ионов при осаждении матричного слоя составляла – 1000 эВ, ток ионного пучка 25 мА, время осаждения – 4 минуты.

Исследование спектров фотолюминесценции (ФЛ) проводилось в спектральном диапазоне 700 – 1000 нм ($T=300^\circ\text{K}$). В качестве источника возбуждающего оптического излучения использовался инжекционный лазер $P = 8 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$, длина волны которого – 402 нм. В качестве фотодетектора использовался германиевый фотодиод ФДГ с рабочим спектральным диапазоном длин волн от 0,5 до 2 мкм.

Исследование поверхности полученных образцов КТ InGaAs проводили на атомно – силовом микроскопе NM – MDT Ntegra.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки влияния состава твердого раствора GaInAs на размеры КТ в процессе формирования методом ионно-лучевого осаждения были проведены АСМ – исследования гетероструктур с «незакрытыми» одиночными слоями КТ, выращенных на GaAs – подложках (100). Установлено, что при температуре 550°C , времени выращивания 3 минуты, энергии ионов 1000 эВ и величине ионного тока 25 мА, на поверхности подложки GaAs в зависимости от состава твердого раствора образуются квантовые точки GaInAs куполообразной формы в диапазоне размеров от 6 до 55 нм. Процентное содержание Ga в твердом растворе при этом изменялось в пределах от 0,65 до 0,9 ат %.

Для КТ на основе составов $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{As}$, $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{As}$, $\text{Ga}_{0,76}\text{In}_{0,24}\text{As}$, $\text{Ga}_{0,85}\text{In}_{0,15}\text{As}$ характерны наименьшие размеры 6-17 нм. Высота КТ составляет 8-20 нм, а поверхностная плотность составляет довольно высокие значения (в среднем $6 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$). Как известно, с уменьшением размеров КТ ширина запрещенной зоны полупроводниковых материалов увеличивается, кроме того факт увеличения поверхностной плотности КТ на основе данных твердых растворов позволяет говорить о перспективности применения полученных результатов для формирования на их основе *p-i-n* – структур для ФЭП. На основе полученных результатов возможно формирование вертикально связанных слоев КТ, что способствует увеличению КПД ФЭП на основе гетероструктур.

В тоже время при исследовании результатов, полученных на основе первого состава $\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$, было установлено, что максимальный размер КТ увеличивается до 55–60 нм при увеличении атомной доли Ga в твердом растворе до 0,9 %. Полученные результаты представлены на рисунке 1. Результаты АСМ – исследований поверхности образца с КТ на основе твердого раствора $\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$ свидетельствуют о том, что средний размер наноструктур составляет 35-60 нм, высота – 30-50 нм. Данные проведенного статистического анализа указывают, что поверхностная плотность полученных КТ составляет довольно низкие значения $1 \times 10^{10} \text{ мм}^{-2}$. Возможно, полученные результаты являются следствием увеличения упругой энергии деформации, которая растет с увеличением доли Ga в твердом растворе. Возрастающие при этом вследствие разности постоянных решеток напряжения приводят к тому, что размер КТ увеличивается, а плотность уменьшается.

Необходимо также отметить, что полученные результаты свидетельствуют о том, что латеральная составляющая скорости роста КТ в данном случае является выше нормальной. В этом случае происходит срастание зародышевых островков в планарный эпитаксиальный слой. Это объясняется тем, что при температуре подложки 550°C изначальной энергии подложки GaAs достаточно для формирования сплошной пленки твердого раствора GaInAs. Наряду с КТ, имеющими максимальное распределение по размерам 50-55 нм, на поверхности подложки также наблюдаются группы островков с характерными размерами 35-65 нм. Полученные результаты можно охарактеризовать, как многомодальное распределение КТ по размерам.

Необходимо отметить, что на кристаллическое совершенство, плотность, а также, размер КТ существенное влияние оказывает состояние поверхности подложки, на которой происходит формирование КТ и, в том числе, рост на разориентированных подложках. Данные факты также требуют проведения дополнительных исследований в условиях ИЛО.

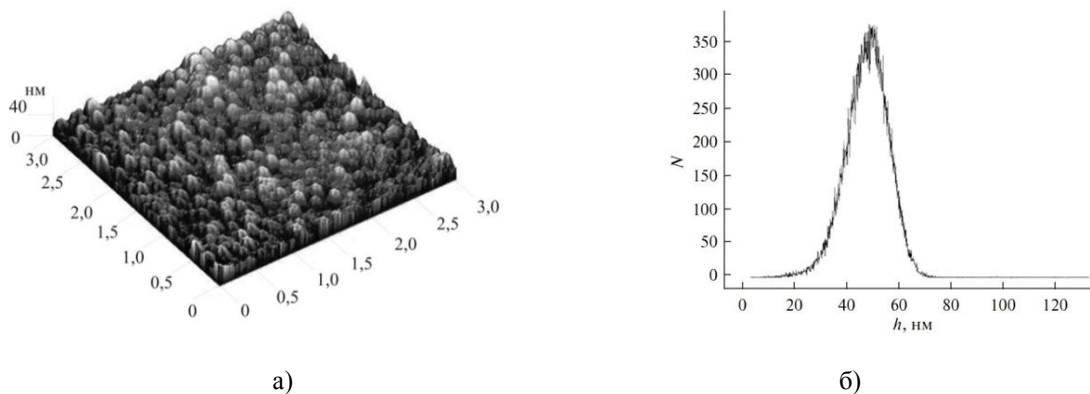


Рисунок 1 – а) 3D АСМ – изображение наноструктур $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ -GaAs полученных методом ИЛО; б) зависимость количества островков (N) от их размера (h) [a) 3D AFM image of $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ -GaAs nanostructures obtained by the ILO method; b) dependence of the number of islands (N) on their size (h)]

На рисунке 2 представлены результаты исследований спектров фотолюминесценции полученных КТ различных составов.

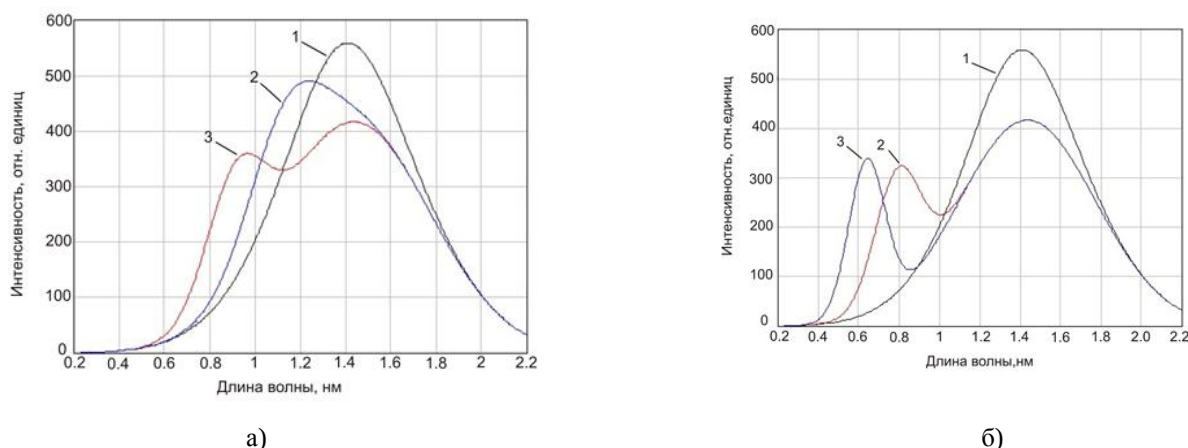


Рисунок 2 – Спектры фотолюминесценции полученных КТ GaInAs – GaAs различных составов:
 а) 1 – $\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$; 2 – $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{As}$; 3 – $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{As}$; б) 1 – $\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$; 2 – $\text{Ga}_{0,76}\text{In}_{0,24}\text{As}$; 3 – $\text{Ga}_{0,85}\text{In}_{0,15}\text{As}$
 [Photoluminescence spectra of obtained GaInAs – GaAs QDs of various compositions: а) 1 – $\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$; 2 – $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{As}$; 3 – $\text{Ga}_{0,65}\text{In}_{0,35}\text{As}$; б) 1 – $\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$; 2 – $\text{Ga}_{0,76}\text{In}_{0,24}\text{As}$; 3 – $\text{Ga}_{0,85}\text{In}_{0,15}\text{As}$]

Результаты исследования спектров ФЛ для 1-ого, 2-ого и 3-го состава свидетельствуют о том, что увеличение концентрации Ga в твердом растворе приводит к коротковолновому сдвигу спектра. Также хорошо видно, что с изменением состава наноструктур изменяется и положение пика фотолюминесценции. Так при увеличении индия в составе пик смещается в сторону меньших энергий. Для 3-го состава (рисунок 2 а.) ФЛ разбивается на два пика. Пик, соответствующий длине волны 9 нм – КТ GaInAs, пик, соответствующий длине волны 1,44 нм – материалу подложки GaAs.

На рисунке 2 б, отчетливо видны два характерных пика соответствующих длине волны (0,66 и 0,8 нм) – соответствующих 4-му и 5-му составу КТ GaInAs, в то время, как для 1-ого состава характерно смещение пика в коротковолновую область, что свидетельствует также об увеличении размера КТ.

Также необходимо отметить, что положение максимума ФЛ (энергию локализации электронно-дырочных пар E_{exc}) можно использовать для оценки среднего объема КТ. Энергия локализации зависит от объема и от формы квантово-размерного объекта. Отчетливо видны два ярко выраженных пика, что говорит о ФЛ подложечного материала (GaAs) и фотолюминесценции КТ GaInAs. Изменение положения пика ФЛ слоя с квантовыми точками GaInAs наблюдается в коротковолновой области [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной исследовательской работы методом ионно-лучевого осаждения были получены квантовые точки на основе трехкомпонентного твердого раствора GaInAs различных составов. На основе полученных результатов определено оптимальное соотношение компонентов в твердом растворе, при котором квантовые точки характеризуются наименьшими размерами, а также увеличивается их плотность. Представлены результаты исследования спектров фотолюминесценции, морфологии поверхности полученных наноструктур. Полученные результаты могут представлять практический интерес в качестве активных слоев полупроводниковых $p-i-n$ – структур для эффективных фотоэлектрических преобразователей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леденцов, Н.Н. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры [Текст] / Н.Н. Леденцов [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32, вып. 4. – С. 385-410.
2. Лунин, Л.С. Новые возможности ионно-лучевых технологий в задачах получения оптоэлектронных устройств на основе многокомпонентных соединений АЗВ5 [Текст] / Л.С. Лунин, И.А. Сысоев // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Техн. науки. – 2003. – Спец. вып. С. 53-54.
3. Лунин, Л.С. Ионно-лучевое осаждение фотоактивных нанослоев кремниевых солнечных элементов [Текст] / Л.С. Лунин, С.Н. Чеботарев, А.С. Пашенко, Л.Н. Балабанова // Неорганические материалы. – 2012. – Т. 48. – № 5. – С. 517-522.
4. Лунин, Л.С. Исследование фоточувствительных гетероструктур InAs/GaAs с квантовыми точками, выращенных методом ионно-лучевого осаждения [Текст] / Л.С. Лунин [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2011. – № 6. – С. 58-62.
5. Блохин, С.А. Фотоэлектрические преобразователи AlGaAs/GaAs с массивом квантовых точек InGaAs [Текст] / С.А. Блохин [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43, вып. 4. – С. 537-542.
6. Чеботарев, С.Н. Исследование фототока в солнечных элементах на гетероструктурах с массивом квантовых точек / С.Н. Чеботарев, А.С. Пашенко // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Техн. науки. 2013. Вып. № 2. – С. 97-99.
7. Салий, Р.А. Определение технологических параметров роста в системе InAs-GaAs для синтеза «многомодальных» квантовых точек InAs методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений [Текст] / Р.А. Салий [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2015. – 49, вып. 8.
8. Благин, А.В. Физико-технологические особенности ионно-лучевого осаждения наноразмерных структур на основе твердых растворов АЗВ5 [Текст] / А.В. Благин [и др.] // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Техн. науки. – 2011. № 5. – С. 125-128.
9. Лунин, Л.С. Формирование квантовых точек InAs на подложках GaAs методом ионно-лучевого осаждения / Л.С. Лунин, И.А. Сысоев, С.Н. Чеботарев, А.С. Пашенко // Вестн. Южного науч. центра РАН. – 2010. – Т. 6, № 4. – С. 46-49.
10. Сысоев, И.А. Формирование массивов квантовых точек $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}/GaAs$ в процессе ионно-лучевого осаждения [Текст] / И.А. Сысоев [и др.] // Неорганические материалы. – 2014. – Т. 50, № 3. – С. 237-244.

REFERENCES

- [1] Ledentsov N.N. Geterostruktury` s kvantovy`mi tochkami: poluchenie, svojstva, lazery` [Heterostructures with Quantum Dots: Obtaining, Properties, Lasers]. Fizika i tekhnika poluprovodnikov [Physics and Technology of Semiconductors]. 1998. Vol. 32. Issue. 4. P. 385-410 (in Russian).
- [2] Lunin L.S. Novy`e vozmozhnosti ionno-luchevy`x tehnologij v zadachax polucheniya optoe`lektronny`x ustrojstv na osnove mnogokomponentny`x soedinenij A3V5 [New Possibilities of Ion-Beam Technologies in the Problems of Obtaining Optoelectronic Devices Based on A3B5Multicomponent Compounds]. Izv. vuzov. Severo-Kavkazskij region. Texn. nauki [North Caucasian Region University Bulletin Technical Science]. 2003. Special. no. P. 53-54 (in Russian).
- [3] Lunin L.S. Ionno-luchevoe osazhdenie fotoaktivny`x nanosloev kremnievy`x solnechny`x e`lementov [Ionic-Beam Deposition of Photoactive Nanolayers of Silicon Solar Cells]. Neorgan. materialy [Inorganic Materials]. 2012. T. 48. № 5. P. 517-522 (in Russian).
- [4] Lunin L.S. Issledovanie fotochuvstvitel`ny`x geterostruktur InAs/GaAs s kvantovy`mi tochkami, vy`rashhenny`x metodom ionno-luchevogo osazhdeniya [Study of Photosensitive Heterostructures of InAs / GaAs with Quantum Dots Grown by the Method of Ion-Beam Deposition]. Poverxnost`. Rentgenovskie, sinxrotronny`e i nejtronny`e issledovaniya [Surface. X-ray, Synchrotron and Neutron Studies]. 2011. № 6. P. 58-62 (in Russian).
- [5] Bloxin S.A. et al. Fotoe`lektricheskie preobrazovateli AlGaAs/GaAs s massivom kvantovy`x tocek InGaAs [AlGaAs / GaAs Photoelectric Converters with an InGaAs Quantum Dot Array]. Fizika i tekhnika poluprovodnikov [Semiconductor Physics and Technology]. 2009. T. 43. V. 4. S. 537-542 (in Russian).
- [6] Chebotarev S.N., Pashhenko A.S. Issledovanie fototoka v solnechny`x e`lementax na

- geterostrukturax s massivom kvantovy`x toчек [Investigation of Photocurrent in Solar Cells on Heterostructures with an Array of Quantum Dots] *Izv. vuzov. Severo-Kavkazskij region. Texn. nauki.* [North Caucasian Region University Bulletin Technical Science]. 2013. № 2. S. 97-99 (in Russian).
- [7] Salij R.A. et al. Opredelenie texnologicheskix parametrov rosta v sisteme InAs-GaAs dlya sinteza «mnogomodal`ny`x» kvantovy`x toчек InAs metodom gazofaznoj e`pitaksii iz metalloorganicheskix soedinenij [Determination of Technological Parameters of Growth in the InAs-GaAs System for the Synthesis of “Multimodal” InAs Quantum Dots by the Method of Gas Phase Epitaxy from Organometallic Compounds]. *Fizika i texnika poluprovodnikov* [Semiconductor Physics and Technology]. 2015. T. 49. V. 8 (in Russian).
- [8] Blagin A.V. Fiziko-texnologicheskie osobennosti ionno-luchevogo osazhdeniya nanorazmerny`x struktur na osnove tverdyy`x rastvorov A3B5 [Physico-Technological Features of Ion-Beam Deposition of Nanosized Structures Based on A3B5 Solid Solutions]. *Izv. vuzov. Severo-Kavkazskij region. Texn. nauki.* [North Caucasian Region University Bulletin Technical Science]. 2011. № 5. P. 125-128 (in Russian).
- [9] Lunin L.S. Formirovanie kvantovy`x toчек InAs na podlozhkax GaAs metodom ionno-luchevogo osazhdeniya [Formation of InAs Quantum Dots on GaAs Substrates by Ion-Beam Deposition]. *Vestn. Yuzhnogo nauch. centra RAN* [Southern Scientific center of RAS Bulletin]. 2010. T. 6. № 4. P. 46-49 (in Russian).
- [10] Sysoev I.A. Formirovanie massivov kvantovy`x toчек GaIn1-xAsyP1-y/GaAs v processe ionno-luchevogo osazhdeniya [The Relationship between the Sizes of Quantum Dots in InAs-QD / GaAs with the Photoluminescence Spectrum]. *Neorganicheskie materialy`* [Inorganic Materials]. 2014. T. 50. №3. P. 237-244 (in Russian).

Elements for Solar Batteries on the GaInAs Nanostructure Basis Obtained by Ion-Beam Deposition Method

I.A. Sysoev*¹, D.A. Gusev**², A.E. Dembitsky**³, A.Yu. Smolin**⁴, V.F. Kataev**⁵

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education "North Caucasian Federal University", Pushkin street, 1, Stavropol, Russia 355009

¹ORCID iD: 0000-0001-5415-0782

WoS Researcher ID: Q-1522-2015

e-mail: eianpisia@yandex.ru

**Volgodonsk Engineering-Technical Institute – Branch of NRNU «MEPhI», Lenin street, 73/94, Volgodonsk, Russia 347360

²ORCID iD: 0000-0002-4997-9497

WoS Researcher ID: M-9350-2016

e-mail: dmon_@mail.ru

³ORCID iD: 0000-0003-4616-621X

WoS Researcher ID: O-3133-2018

e-mail: demartev@gmail.com

⁴ORCID iD: 0000-0002-0148-2086

WoS Researcher ID: F-4089-2017

e-mail: smol_vol@mail.ru

⁵ORCID iD: 0000-0001-5217-0991

WoS Researcher ID: Q-1673-2018

e-mail: kataev.v.f.@gmail.com

Abstract – The study experimentally showed the possibility of quantum dots formation based on three-component InGaAs solid solutions of various compositions on the surface of GaAs by the method of ion-beam deposition of quantum dots. The features of the technology of ion – beam deposition are considered. The optimal ratios of the of the GaInAs solid solution components are determined at which the quantum dots are characterized by the smallest dimensions, and the technological conditions are established where their density increases. The results of the study of the photoluminescence spectra and the surface morphology of the obtained nanostructures are presented. The results obtained may be of practical interest as materials for the formation of highly efficient solar cell panels on their basis, which are widely used as alternative environmentally friendly energy sources in the energy sector at present .

Keywords: solar cells, nanoscale structures, multicomponent solid solutions, ion beam deposition, technology, materials for photovoltaic cells.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 681.5;512.64;621.37

**ТОКОВЫЕ ЦИФРОВЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ
И IP-МОДУЛИ ДЛЯ ЗАДАЧ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
И КОНТРОЛЯ ЯДЕРНЫМИ ОБЪЕКТАМИ**

© 2019 Н.В. Бутырлагин^{*}, Н.И. Чернов^{*}, Н.Н. Прокопенко^{*/**}, А.В. Бугакова^{*}

^{*}Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

^{**}Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, г. Зеленоград, Россия

Рассмотрены особенности проектирования специальной электронной компонентной базы (ЭКБ) для систем автоматического управления и контроля ядерных энергетических установок. В отличие от классических потенциальных цифровых устройств – ЭКБ данного класса базируется на свойствах токовых логических элементов (ТЛЭ). Дано более полное и систематическое изложение основных положений синтеза ТЛЭ. Описан процесс синтеза функций основной функционально полной системы при использовании наборов логико-арифметических и логических операций. Сформулированы направления дальнейших исследований в области токовой ЭКБ. Обсуждаются линейные представления логических функций Булевой и линейной алгебры для двузначной и трехзначной логик. Рассмотрены базовые компоненты ТЛЭ. Представлены схемы, реализующие логические операции в различных базисах – «усеченная разность», «модуль разности», «сравнение», а также их комбинаций. Показаны преимущества ТЛЭ по сравнению с потенциальными цифровыми логическими элементами.

Ключевые слова: электронная компонентная база, системы автоматического управления, цифровые токовые структуры, логические элементы, представления логических функций, двузначная логика, трехзначная логика, надёжность.

Поступила в редакцию 10.02.2019

После доработки 22.02.2019

Принята к публикации 28.02.2019

Введение. Вычислительные устройства систем автоматического управления и контроля ядерных энергетических установок [1] выполняются сегодня в технологиях классической цифровой электронной компонентной базы (ЭКБ), которая работает с потенциальными логическими сигналами [2]. Предельные возможности данного класса цифровой ЭКБ, математической основой синтеза которой является булева алгебра, хорошо изучены и предельно использованы [3]. Существенные результаты здесь получены за счёт радиационно-стойких и высокотемпературных технологических процессов [4]. Что касается потенциальных микроэлектронных изделий с малыми топологическими нормами (7-28 мкм), то для задач ответственного применения они не рекомендуются из-за снижения надёжности. Нишей для их практического использования пока остаются мобильные устройства интернета вещей и другая бытовая техника.

В последние годы активно развиваются исследования в области альтернативных логических элементов и вычислительных устройств, обрабатывающих не потенциальные, а токовые логические сигналы [5-8]. Однако это направление не может пока конкурировать с потенциальной ЭКБ, прежде всего из-за отсутствия серийных микросхем данного класса. В то же время ряд задач построения специальных

контроллеров, сверхбыстродействующих АЦП, преобразователей сигналов датчиков с токовым выходом и т.п., могут быть решены путём реализации токовых устройств на базовых матричных кристаллах, в том числе ОАО «Интеграл» г. Минск, ООО «Дизайн центр «Союз» и др. [9].

Авторы настоящей работы более 30 лет посвятили изучению нетрадиционных (неклассических) методов логического синтеза и схемотехнической реализации цифровых структур. Время показало целесообразность исследований в этом направлении, поскольку возможности развития классических методов синтеза и реализации таких структур практически исчерпаны либо приближаются к физическому пределу [6]. Справедливости ради следует отметить, что «классика» создания цифровых структур развивалась, в основном, за счет совершенствования технологии, логический синтез оказался более статичной составляющей развития. Математический аппарат логического синтеза (булева алгебра) до настоящего времени сохранился в неизменном (с момента его создания) виде.

Справедливости ради стоит отметить, что неклассический синтез цифровых структур не стоял на месте [10]. Именно это обстоятельство привело авторов настоящей работы, в первую очередь, к необходимости перехода к иному, отличному от булевой логики, математическому аппарату логического синтеза. Как оказалось, в последствие, такая замена привела к соответствующей замене схемотехники и класса реализуемых цифровых структур (синтез потенциальных структур заменился синтезом токовых). Осознание возникающих при этом новых возможностей и особенностей логического синтеза и схемотехнической реализации цифровых токовых структур (ЦТС) привело авторов к необходимости формирования базовой концепции создания ЦТС, указывающей эти особенности и возможности, определяющей исходные логические и схемотехнические структуры, используемые при создании ЦТС, и методы их синтеза [11].

Намечающийся переход на считающиеся перспективными новые принципы построения цифровых структур (молекулярные, квантовые, оптические и т.д.) обусловлен тем, что традиционная схемотехника достигла пределов своего развития:

- возможности дальнейшего повышения степени интеграции за счет уменьшения размеров отдельных транзисторов ограничены нарушением физических процессов их функционирования.

- увеличение количества линий связей между элементами приводит к неэффективному использованию полезной площади кристалла (межсоединения занимают до 80%) и увеличению паразитных емкостей внутри БИС, что ограничивает быстродействие и ухудшает их энергетические характеристики (до 75% энергии затрачивается на перезаряд межпроводных емкостей) [12].

Отсюда следует, что непосредственными задачами дальнейшего улучшения технических характеристик традиционных БИС являются:

- уменьшение потребного количества транзисторов на реализацию операций, т.е. снижение функциональной избыточности схемотехники БИС;
- уменьшение количества линий связи в БИС.

Средствами решения этих задач являются две основных составляющих процесса создания БИС: логическое проектирование и технология.

Возможности логического проектирования в решении этих задач:

- уменьшения аппаратных затрат можно достичь за счет уменьшения промежуточных преобразований информации при преобразовании исходного описания задачи в форму обработки ее внутри БИС и обратно;

- поскольку исходное описание алгоритмов функционирования цифровых структур чаще всего формулируется в математической форме, для обработки

информации внутри БИС следует использовать математические операции, требующие минимальных затрат на их реализацию (главным образом, арифметические) с представлением сигналов в форме, удобной для обработки (например, в токовой);

– уменьшения числа связей можно достичь повышением их информативности, т.е. переходом к внутреннему многозначному представлению сигналов.

Технологические возможности улучшения частотных и энергетических характеристик БИС состоят в использовании технологий создания БИС, основанных на использовании токового представления сигналов. Естественные ограничения возможностей по развитию новых технологий приводят к осознанию необходимости максимального использования существующих технологий для создания БИС с техническими характеристиками, превышающими характеристики существующих БИС. Одним из таких направлений является создание многозначных (многоуровневых) БИС. При этом булев подход в этом направлении «натывается» на отсутствие аппаратных средств для его реализации (физических элементов с числом состояний, превышающим 2). В этом плане токовые схемы являются более перспективными, поскольку многозначный токовый сигнал может быть получен простым суммированием двужначных квантов тока (много – это совокупность единиц!). Формирование же таких сигналов на существующей элементной базе не составляет проблемы.

Реализация ЦТС – «попутное» решение еще одной проблемы современных тенденций создания цифровых устройств – «систем-на-кристалле» [13-15] – совмещения технологий изготовления цифровых и аналоговых схем (цифровые функциональные элементы ЦТС: сумматоры, токовые зеркала – аналоговые!).

Наконец, эксплуатационные особенности линейных БИС, реализованных на токовых зеркалах, определяются пониженными требованиями к стабильности напряжения питания, что позволяет обойтись без стабилизированных источников питания, объем и вес которых может достигать 50–70% объема и веса аппаратуры в целом. Кроме того, токовые сигналы обеспечивают минимальный уровень внутренних помех.

Перечисленные и другие особенности ЦТС определяют целесообразность их разработки и создания, а, значит, и методов логического синтеза, схемотехнического проектирования и применения в устройствах управления и обработки информации.

Первоначальные результаты формирования базовой концепции логического синтеза и схемотехнической реализации ЦТС, сформулированные авторами на базе предыдущих исследований, были опубликованы в 2013 году [11]. Последующие исследования привели к получению новых, переосмыслению полученных ранее результатов и уточнению некоторых положений базовой концепции. Поэтому целью настоящей работы является более полное и систематическое изложение основных положений базовой концепции и формулирование направлений дальнейших исследований логического синтеза и схемотехнического проектирования ЦТС.

Базовая концепция линейного синтеза ЦТС. Основные положения. Альтернативный подход к логическому синтезу многозначной цифровой элементной базы, предложенный авторами [16-17], состоит в переходе от логических (качественных) значений логических переменных к численным (количественным) значениям. Как показывает анализ, столь простая замена представления приводит к принципиальным изменениям в логическом синтезе и схемотехнической реализации многозначных ИС в целом. Эти изменения состоят в следующем:

1) Логическое значение переменной определяется не состоянием реализующей схемы, а количественным значением формируемого ею сигнала. Поскольку имеющиеся в распоряжении разработчиков элементы – двужначные, то многозначный сигнал может

быть сформирован естественным способом – суммированием двузначных значений. Это предполагает использование арифметических операций в логическом синтезе и соответствующих средств их реализации – в схемотехнике и технологии.

2) Увеличивается число комбинаций арифметических и логических операций, пригодных для использования в логическом синтезе, и, следовательно, количество возможных схемотехнических решений. Помимо собственно арифметических операций линейного пространства (сложения, вычитания, умножения и деления на конечное число) возможно использование «логико-арифметических» операций, в частности:

$$\begin{aligned}
 & \text{– усеченной разности } y = x_1 \div x_2 = \begin{cases} x_1 - x_2 & \text{при } x_1 \geq x_2 \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases} \\
 & \text{– модуля разности } y = |x_1 - x_2| = \begin{cases} x_1 - x_2 & \text{при } x_1 \geq x_2 \\ 0 & \text{при } x_1 = x_2 \\ x_2 - x_1 & \text{при } x_2 > x_1 \end{cases} ,
 \end{aligned}$$

и логических операций, в частности:

$$\text{– сравнения } y = x_1 > x_2 = \begin{cases} 1, & \text{если "истина"} \\ 0, & \text{если "ложь"} \end{cases} .$$

Возможно, есть и другие операции, пригодные для использования в логическом синтезе ЦТС.

3) Использование этих операций для формирования базисов возможно как в «одиночном» (усеченная разность $\div$, модуль разности $|-|$ или сравнение $>$) так и в «групповом» (усеченная разность $\div$, сравнение $>$; усеченная разность $\div$, модуль разности $|-|$; сравнение $>$, модуль разности $|-|$ или усеченная разность $\div$, усеченная разность $\div$, модуль разности $|-|$) режимах, т.е. набор базисных векторов может быть (с)формирован с использованием либо только одной либо нескольких из представленных выше операций, а также с применением (либо без применения) операций линейного пространства. Примеры базисов указанных типов будут приведены далее.

4) Линейная алгебра – готовый математический аппарат логического синтеза ЦТС, применимый в логиках любой значности. Аппарат линейной алгебры хорошо разработан, широко известен и доступен для освоения. Остается оценить практику, смысл и последствия известных матричных преобразований в линейном синтезе.

5) Логический синтез в этом случае это – представление вектора в данном базисе. Процесс линейного логического синтеза, как известно, состоит в получении коэффициентов разложения синтезируемой функции по выбранному базису. Для получения этих коэффициентов вектор-строка значений реализуемой функции скалярно умножается на вектор-столбцы обратной базисной матрицы. Представление логической функции в данном базисе записывается в виде алгебраической суммы взвешенных полученными коэффициентами векторов базиса. Средством упрощения полученного выражения может быть его факторизация (приведение подобных членов и применение допустимых преобразований выражений, построенных на основе используемых операций).

Выбор базиса определяется:

- математически – требованием линейной независимости векторов базиса;
- технологически – простотой реализации и логической мощностью (минимальным количеством базисных векторов в представлении реализуемой

логической функции) при синтезе заданных логических функций.

В приведенной ниже таблице 1 показаны представления наиболее применяемых логических операций в двухзначной и трехзначной логиках.

Таблица 1 – Линейные представления логических функций [Linear representations of logical functions]

Линейные представления логических функций (линейные представления от логических функций)			
Булева алгебра	Линейная алгебра		
Двухзначная логика			
$\&, \vee, -$	$x_1 \div x_2$	$ x_1 \div x_2 $	$x_1 > x_2$
$\&(x_1, x_2)$	$(x_1 + x_2) \div 1$	$\frac{1}{2}(x_1 + x_2 - x_1 \div x_2)$	$(x_1 + x_2) > 1$
$\vee(x_1, x_2)$	$1 \div [1 \div (x_1 + x_2)]$	$\frac{1}{2}(x_1 + x_2 + x_1 \div x_2)$	$(x_1 + x_2) > 0$
$\bar{x}$	$1 \div x$	$ 1 \div x $	$1 > x$
$\oplus(x_1, x_2)$	$x_1 + x_2 - 2[(x_1 + x_2) \div 1]$	$ x_1 - x_2 $	$(x_1 > x_2) + (x_2 > x_1)$
Многозначная (трехзначная) логика			
$\min(x_1, x_2)$	$x_1 - (x_1 \div x_2)$	$\frac{1}{2}(x_1 + x_2 - x_1 \div x_2)$	$x_1 - (x_1 > x_2)$
$\max(x_1, x_2)$	$x_1 + (x_2 \div x_1)$	$\frac{1}{2}(x_1 + x_2 + x_1 \div x_2)$	$x_1 + (x_2 > x_1)$
$x \oplus i$	$x + i - k[1 \div (k \div (x + i))]$	-	$x + i - k[(x + i) > (k - 1)]$
$\oplus(x_1, x_2)$	$x_1 + x_2 - k[1 \div (k \div (x_1 + x_2))]$	$\frac{1}{2}(1 - x_1 - x_2 - 3 1 \div x_2 +$ $+ 3 1 \div x_1 \div x_1 \div x_2)$	$x_1 + x_2 - k[(x_1 + x_2) > (k - 1)]$

6) Использование арифметических операций для представления логических функций в линейных пространствах предполагает выбор такой формы физического сигнала-носителя, которая позволяла бы реализовать их максимально просто. Поэтому авторами предлагается использовать токовую форму представления сигналов, поскольку сложение и вычитание токов осуществляется монтажно (возможно потребуются выходной формирователь), т.е. без аппаратных затрат! При соответствующем выборе величины кванта тока их возможное количество в диапазоне напряжения питания может быть вполне достаточным для выбранной значности логики.

7) Разностное представление результата выполнения некоторой операции $f(x^{(\tilde{n})}) = \varphi_1(x^{(\tilde{n})}) - \varphi_1(x^{(\tilde{n})})$, определяет малую зависимость его значения от действия возмущающих воздействий и, следовательно, возможность работы элементов на начальном (нелинейном!) участке выходной характеристики, т.е. в микроощном режиме и строить токовые БИС с минимальным энергопотреблением. Кроме того, разностное представление является средством схемотехнического повышения устойчивости ЭКБ к внешним возмущениям (девиация питания, температура, радиационное воздействие), в конечном итоге – средством повышения надежности.

8) Схемотехническая реализация токовой формы представления сигнала состоит в представлении значений термов реализуемой логической функции величинами токов зеркал, знаков токов – направлениями токов (втекающих и вытекающих) и их последующем алгебраическом суммировании. Монтажная реализация последней операции обеспечивает уменьшение аппаратных затрат и улучшение технических и эксплуатационных характеристик элементной базы. Кроме того, токовое представление сигналов обеспечивает минимальный уровень внутренних помех.

Для физического представления сигналов в этом случае удобно использовать

кванты входящего или выходящего токов, а реализацию арифметических операций производить монтажным объединением соответствующих наборов квантов с последующим формированием выходного сигнала для последующего использования. Двухзначной функциональной элементной базы, реализующей арифметические операции, вполне достаточно для реализации значений, больших 1, причем эти реализации хорошо согласуются с их математическим представлением в виде суммы двухзначных значений.

9) Логический синтез и реализация ЦТС возможна в виде:

- многозначно-многозначном (многозначные переменные – многозначные функции, многозначный базис);
- многозначно-двухзначном (многозначные переменные – совокупность двухзначных функций, многозначный базис);
- двухзначно-двухзначном (двухзначные переменные – совокупность двухзначных функций, двухзначный базис);
- двухзначно-многозначном (двухзначные переменные – многозначные функции, двухзначный базис).

При этом все четыре вида реализуются единообразно: представление реализуемой функции вектором (набором векторов), выбор базиса, получение вектора представления (набора векторов) и логического выражения (выражений) функции в данном базисе.

О логическом синтезе линейных ЦТС. Как уже было отмечено выше, логический синтез в линейной алгебре – это представление вектора значений реализуемой логической функции в заданном базисе линейного пространства. Приведем процесс и результаты линейного логического синтеза функций основной функционально полной системы при использовании различных наборов операций, приведенных выше. Они (процесс и результаты) не зависят от значности.

В двухзначной линейной логике булев логический синтез с использованием функционально полной «штриха Шеффера» может быть описан как синтез в базисе:

$$A = \begin{bmatrix} 1 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_1 x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A^{(-1)} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Представления операций основной функционально полной системы в этом базисе имеют вид:

$$\begin{aligned} \min(x_1, x_2) &= x_1 x_2; \\ \max(x_1, x_2) &= x_1 + x_2 - \min(x_1, x_2); \\ x \oplus i &= 1 - x. \end{aligned}$$

Многозначные базисы с аналогичными свойствами могут быть построены как обобщения соответствующих двухзначных базисов. Ниже приведен один из таких возможных трехзначных базисов, построенный на основе «традиционного» обобщения булевых операций, с помощью которого можно получить представления любой трехзначной логической функции в линейно-многозначной форме.

$$A = \begin{bmatrix} 1 \\ x_1^1 \\ x_1^2 \\ x_2^1 \\ \min(x_2^1, x_1^1) \\ \min(2x_2^1, x_1^1) \\ x_2^2 \\ \min(x_2^2, 2x_1^1) \\ \min(x_2^2, x_1^2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

где $x_i^j = \min(x_i, j)$, с обратной матрицей:

$$A^{(-1)} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & -1 & 0 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & -2 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Трехзначные обобщения базовых двуместных операций в этом базисе имеют вид:

$$\begin{aligned} \min(x_1, x_2) &= \min(x_1^2, x_2^2), \\ \max(x_1, x_2) &= x_1^2 + x_2^2 - \min(x_1^2, x_2^2). \end{aligned}$$

Представление операции $x \oplus i$ получим с помощью базиса одной переменной:

$$A = \begin{bmatrix} 1 \\ x^1 \\ x^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix},$$

с обратной матрицей:

$$A^{(-1)} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}.$$

В результате получим:

$$\begin{aligned} x \oplus 1 &= 1 + 3x^1 - 2x^2; \\ x \oplus 2 &= 2 - 3x^1 + x^2. \end{aligned}$$

Как видно из последних выражений здесь использованы только «традиционная» логическая операция $\min(x_1, x_2)$ и операции линейного пространства.

Многозначно-двузначные представления базовых функций получаются разложением по данному базису двузначных разложений векторов функций. В таблице 2 приведены таблица истинности функции $\min(x_1, x_2)$, а также двузначные разложения базисных векторов и вектора функции.

Таблица 2 – Таблица истинности операции $\min(x_1, x_2)$ при унитарном кодировании [Truth table of operation $\min(x_1, x_2)$ with unitary coding]

x_2	x_1	$\min(x_1, x_2)$	x_{22}	x_{21}	x_{12}	x_{11}	φ_2	φ_1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	1	0	0
0	2	0	0	0	1	1	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0	0
1	1	1	0	1	0	1	0	1
1	2	1	0	1	1	1	0	1
2	0	0	1	1	0	0	0	0
2	1	1	1	1	0	1	0	1
2	2	2	1	1	1	1	1	1

Приведенный выше базис обеспечивает представление функции $\min(x_1, x_2)$ в виде $y = \varphi_1 + \varphi_2$, где:

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \min(x_1^1, x_2^1) - \min(2x_1^1, x_2^1) + \min(x_1^2, x_2^2), \\ \varphi_2 &= \min(x_1^2, x_2^2) - \min(2x_1^1, x_2^2).\end{aligned}$$

Аналогичным образом получаются представления функций $\max(x_1, x_2)$:

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= x_1^1 + x_2^1 - \min(x_1^1, x_2^1), \\ \varphi_2 &= x_1^2 - x_1^1 + x_2^2 - x_2^1 + \min(x_1^1, x_2^1) - \min(x_1^2, x_2^2).\end{aligned}$$

и $x \oplus i$

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= 1 + x^1 - x^2, \\ \varphi_2 &= 2x^1 - x^2.\end{aligned}$$

В силу открытости множества-носителя (множество натуральных чисел $\mathbb{N}$) здесь появляются новые возможности преобразования представлений функций. В «стандартном» варианте линейное пространство рассматривается как замкнутая структура. Это предполагает общий диапазон значности для всех векторов линейного пространства заданной размерности. И если в теории представление векторов с диапазоном значности, отличным от заданного, не является чем-то необычным, то в данном прикладном случае представление векторов функций с диапазоном значности, отличным заданного, является моделью получения представления функции одной значности от переменных другой значности, преобразования, отсутствующего в булевой алгебре!

Для получения двузначных представлений многозначных функций можно использовать базисы, элементами которых являются разложения многозначных переменных и применения к ним двузначных разложений многозначных функций. Таким двузначным аналогом для использованного выше базиса является базис:

$$A = \begin{bmatrix} 1 \\ x_{11} \\ x_{12} \\ x_{21} \\ \&(x_{11}, x_{12}) \\ \&(x_{12}, x_{12}) \\ x_{22} \\ \&(x_{11}, x_{22}) \\ \&(x_{12}, x_{22}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

с обратной базисной матрицей:

$$A^{(-1)} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где базисные векторы $x_{11} - x_{22}$ являются унитарным разложением многозначных переменных x_1 и x_2 .

С помощью этого базиса получаем представление в виде простой суммы двужначных функций $\min(x_1, x_2)$ и $\max(x_1, x_2)$:

$$\begin{aligned} \min(x_1, x_2) &= \varphi_1 + \varphi_2 = \underbrace{x_{11}x_{21}}_{\varphi_1} + \underbrace{x_{12}x_{22}}_{\varphi_2}, \\ \max(x_1, x_2) &= \max(x_1, x_2) = \varphi_1 + \varphi_2 = \underbrace{x_{11} \vee x_{21}}_{\varphi_1} + \underbrace{x_{12} \vee x_{22}}_{\varphi_2}, \end{aligned}$$

и циклического сдвига $x \oplus 1$:

$$x \oplus 1 = \underbrace{\bar{x}_2}_{\varphi_1} + \underbrace{x_1 \bar{x}_2}_{\varphi_2}.$$

Точно также с помощью последнего базиса можно получить двужначное представление исходных представлений функций.

$$\begin{aligned} \min(x_1, x_2) &= \min(x_{11}, x_{21}) + \min(x_{12}, x_{22}), \\ \max(x_1, x_2) &= x_{11} + x_{21} + x_{12} + x_{22} - \min(x_1^1, x_2^1) - \min(x_1^2, x_2^2), \\ x \oplus 1 &= 1 + x_1 - 2x_2. \end{aligned}$$

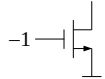
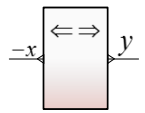
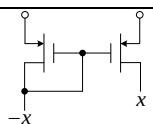
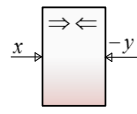
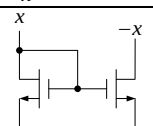
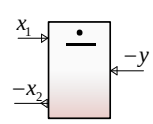
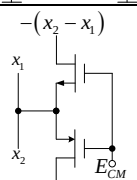
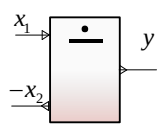
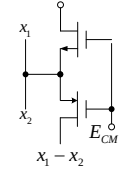
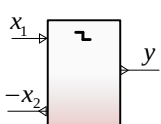
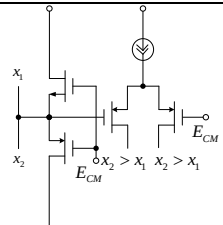
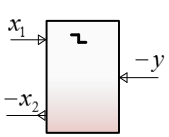
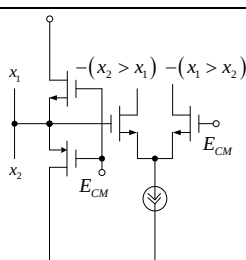
Таким образом, получены выражения базовых трехзначных функций со всеми возможными сочетаниями значностей функций и переменных в линейной логике-аналоге «традиционной» логики. Аналогичным образом могут быть получены выражения базовых и производных логических функций при использовании других арифметико-логических операций и их комбинаций.

О схмотехническом проектировании линейных ЦТС. В «традиционном» схмотехническом проектировании заложена идея формирования некоторого универсального для данной технологии функционального элемента («инвертора») и последующего использования его для построения БИС любой сложности. Такой подход является логичным, поскольку обеспечивает простоту топологического проектирования и выполнения геометрических, тепловых и т.д. расчетов БИС. С этой точки зрения полезно посмотреть достоинства линейного подхода к проектированию БИС. Рассмотрим их применительно к операциям, приведенным выше и их различным комбинациям.

Анализ представлений логических функций привел к выделению базовых математических (а, следовательно, и структурных, и схмотехнических) конструкций, используемых затем для описания (и построения) линейных логических схем.

Основные из этих конструкций и соответствующие им схемотехнические решения приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Базовые компоненты линейных логических схем [Basic linear logic components]

Математическая конструкция	Схемотехническое решение
	
	
	
	
	
	
	
	

С помощью этих базовых конструкций мы будем формировать далее линейные, соответствующие им, схемотехнические реализации логических элементов. Для приведенных далее принципиальных схем можно предложить дуальные по направлению токов схемные решения.

Операция усечённая разность $\div$. Основной компонент схемы – аналоговый сумматор, к выходам которого подключены буферные схемы – токовые инверторы. При отсутствии необходимости использования внутри цифровой схемы один из токовых инверторов может быть исключен. Схема, реализующая операцию *усечённой разности* $\div$, приведена на рисунке 1.

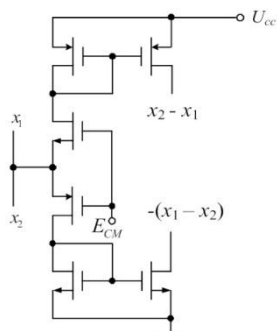


Рисунок 1 – Схемотехническая реализация операции *усечённой разности* $\div$ [Circuit implementation of the truncated difference operation $\div$]

Операция модуль разности $|-|$. Основной компонент схемы – сумматор по модулю, к выходу которого подключена буферная схема – токовый инвертор. Схема, реализующая операцию *модуль разности* $|-|$, приведена на рисунке 2.

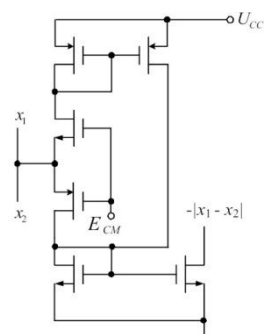


Рисунок 2 – Схемотехническая реализация операции *модуль разности* $|-|$ [Circuit implementation of the difference module operation $|-|$]

Операция сравнение $>$. Основной компонент схемы – компаратор, сравнивающий входные токи. Отличительная особенность компаратора – парафазный выход, увеличивающий его функциональные возможности. При необходимости на один или оба выхода могут быть подключены буферные схемы – токовые инверторы. Схема, реализующая операцию *сравнение* $>$, приведена на рисунке 3.

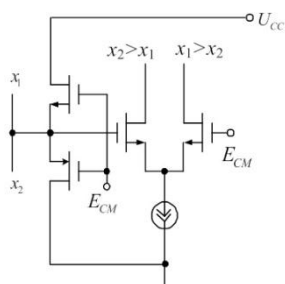


Рисунок 3 – Схемотехническая реализация операции *сравнение* $>$ [Circuit implementation of the operation comparison $>$]

Комбинация операций усеченная разность $\div$ и *сравнение* $>$. Компоненты схемы, реализующие входящие в комбинацию операции, подключены к общим входным сигналам аналогового сумматора и компаратора (это допустимо, поскольку управляющим сигналом является напряжение). Дополнительные логические функции могут быть реализованы организацией связей между сигналами внутри элемента.

Схема, реализующая операции усеченная разность $\div$, сравнение $>$, приведена на рисунке 4.

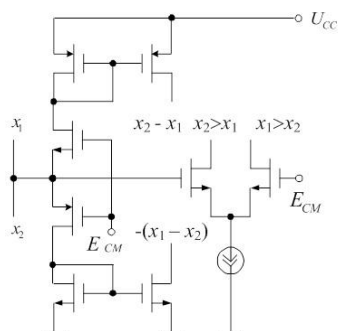


Рисунок 4 – Схемотехническая реализация комбинации операций усеченная разность $\div$, сравнение $>$ [Circuit implementation of a combination of operations truncated difference $\div$, comparison $>$]

Комбинация операций усеченная разность $\div$ и модуль разности $|-|$. Верхний токовый инвертор выполняет две функции: выдает разностный сигнал на выход схемы и участвует в реализации операции модуля разности $|-|$. Реакция на входные сигналы – чисто токовая. Схема, реализующая операции усеченная разность $\div$, модуль разности $|-|$ приведена на рисунке 5.

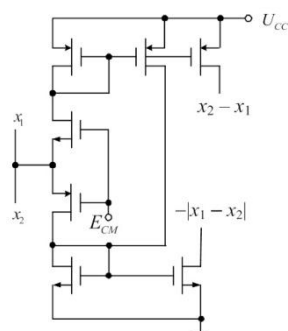


Рисунок 5 – Схемотехническая реализация комбинации операций усеченная разность $\div$ и модуль разности $|-|$ [Circuit implementation of a combination of operations truncated difference $\div$ and modulus of difference $|-|$]

Комбинация операций сравнение $>$ и модуль разности $|-|$. Компоненты схемы, реализующие входящие в комбинацию операции, подключены к общим входным сигналам (это допустимо, поскольку управляющим сигналом является напряжение). Дополнительные логические функции могут быть реализованы организацией связей между сигналами внутри элемента. Схема, реализующая операции сравнение $>$ и модуль разности $|-|$, приведена на рисунке 6.

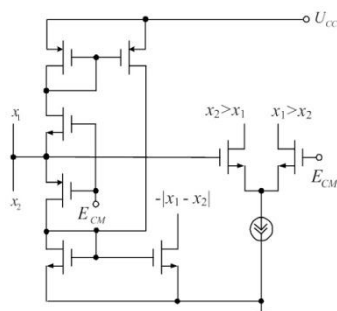


Рисунок 6 – Практическая реализация комбинации операций сравнение $>$ и модуль разности $|-|$ [Practical implementation of the combination of operations comparison $>$ and modulus of difference $|-|$]

Комбинация операций усеченная разность $\div$, сравнение $>$, модуль разности $|-|$. Компоненты схемы, реализующие операции усеченная разность $\div$ и сравнение $>$, входящие в комбинацию, подключены к общим входным сигналам (это допустимо, поскольку управляющим сигналом является напряжение), а реализация разности входных сигналов усеченная разность $\div$ является токовой. Дополнительные логические функции могут быть реализованы организацией связей между сигналами внутри элемента. Схема, реализующая комбинацию операций усеченная разность $\div$, сравнение $>$, модуль разности $|-|$, приведена на рисунке 7.

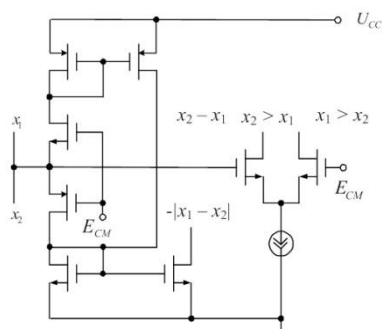


Рисунок 7 – Схмотехническая реализация комбинации операций усеченная разность $\div$, сравнение $>$, модуль разности $|-|$ [Circuit implementation of a combination of operations truncated difference $\div$, comparison $>$, modulus of difference $|-|$]

С использованием приведенных схемных реализаций операций можно строить логические элементы и схемы. Например, для элемента «И» основной функционально полной системы получены схмотехнические решения, приведенные на рисунках 8 и 9.

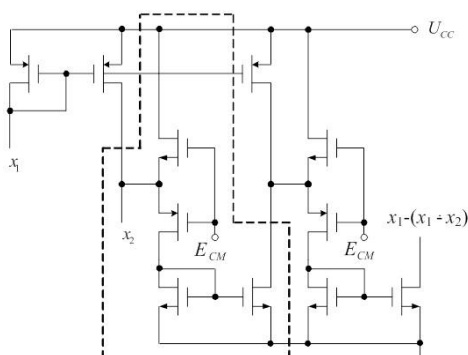


Рисунок 8 – Логический элемент «И» в базисе усеченной разности $\div$ [The logical element "AND" in the basis of the truncated difference $\div$]

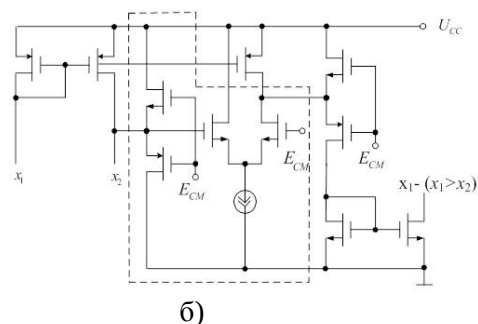
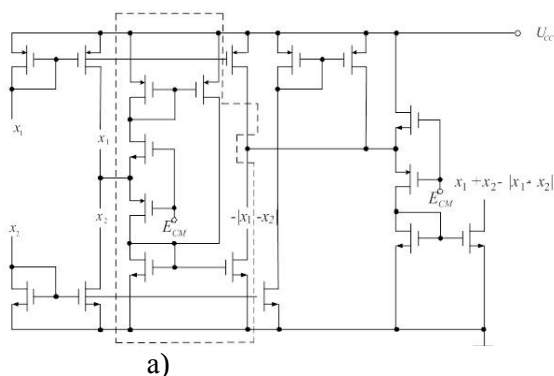


Рисунок 9 – Логический элемент «И» в базисах модуля разности $|-|$ (а) и сравнения $>$ (б) [The logical element "AND" in the bases of the modulus of the difference $|-|$ (a) and comparison $>$ (b)]

На приведенных схемах базовые функциональные элементы выделены пунктирной линией. Все, что находится за пределами функциональных элементов – это дополнительное оборудование, необходимое для обеспечения его успешного функционирования. Как видно из рисунков, оно может составлять значительную часть схемы, однако может быть «спрятано» в предыдущей или последующей схемотехнике.

Как показывает анализ, схемотехнические решения на основе комбинаций операций (рис. 4-7) отличаются лишь тем, что часть дополнительного оборудования, обеспечивающего реализацию заданной логической функции, оказывается внутри схемы элемента.

Выводы. Приведенный вариант базовой концепции логического синтеза и схемотехнического проектирования ТЦС является более полным, качественно определяющим различные аспекты процесса создания ТЦС на основе математического аппарата линейной алгебры.

Структурно двузначные ЦТС оказываются часто сравнимыми по сложности с булевыми. Однако неоспоримым преимуществом ЦТС является возможность создания на их основе элементов многозначной логики, сложность которых сравнивать не с чем.

Технические, технологические и эксплуатационные преимущества ЦТС определяют их право на существование, в том числе, в задачах автоматического управления и спецвычислителей для ядерных энергетических объектов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-00061.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дунаев, В. Системы автоматического управления и контроля для атомных электростанций [Текст] / В. Дунаев, Е. Медведовский // Control Engineering. – № 3 (45). – 2013. – С. 22-31.
2. Хохлов, С.В. Перспективы развития отечественной радиоэлектронной промышленности [Текст] / С.В. Хохлов // Радиопромышленность. – 2014. – Вып. 4. – С. 9-18.
3. Красников, Г.Я. Отличительные особенности и проблемы КМОП-технологии при уменьшении проектной нормы до уровня 0,18 мкм и меньше [Текст] / Г.Я. Красников, О.М. Орлов // Российские нанотехнологии. – 2008. – Т. 3, № 7-8. – С. 124-128.
4. Бумагин, А. Специализированные СБИС для космических применений: проблемы разработки и производства [Текст] / А. Бумагин // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2010. – Вып. 1. – С. 50-56.
5. Wang, Z. Current-Mode CMOS Integrated Circuits for Analog Computation and Signal Processing: A Tutorial. Analog Integrated Circuits for Analog Computation and Signal Processing. 1. 1991. P. 287-295.
6. Wayne, K. Current-Mode CMOS Multiple-Valued Logic Circuits. IEEE. Journal of Solid-State. V.29. No 2. February 1994. P. 95-107.
7. Turgay, T. Implementation of Multi-Valued Logic Gates Using Full Current-Mode CMOS Circuits / T. Turgay, A. Morgul. // Analog Integrated Circuits and Signal Processing, May 2004, Volume 39, Issue 2, P. 191–204.
8. Chang, Y.-H. The design of current mode CMOS multiple-valued circuits / Y.-H. Chang, J. Butler // Proceedings of 21st International Symposium on 'Multiple-Valued Logic, Victoria, 1991, pp. 130-138. DOI: 10.1109/ISMVL.1991.130718.
9. Дворников, О.В. Перспективы применения новых микросхем базового матричного и базового структурного кристаллов в датчиковых системах [Текст] / О.В. Дворников, Н.Н. Прокопенко, Н.В. Бутырлагин, А.В. Бугакова // Труды СПИИРАН, 2016, 2(45). – С. 157-171.
10. Малашевич, Д.Б. Недвоичные системы в вычислительной технике [Текст] / Д.Б. Малашевич // Юбилейная Международная научно-техническая конференция «50 лет модулярной арифметике». – Зеленоград, 23-25 нояб., 2005. – С. 599-613.
11. Chernov, N.I. Basic Concept of Linear Synthesis of Multi-Valued Digital Structures in Linear Spaces / V.Ya. Yugai, N.N. Prokopenko, N.V. Butyrugin // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013). Rostov-on-Don, Russia. September 27-30. 2013. Kharkov National University of Radioelectronics. P. 146-149.

12. Андреев, А.С. Возможности преодоления барьера межсоединений в микроэлектронике [Текст] / А.С. Андреев, А.А. Шука // Зарубежная радиоэлектроника. – 1986. – № 10 – С. 3-19.
13. Адамов, Ю.Ф. Проектирование систем на кристалле [Текст] / Ю.Ф. Адамов, Л.Ю. Шишина // Моск. гос. ин-т электрон. техники (техн. ун-т). – Москва : МИЭТ. – 2005. – 163 с.
14. Немудров, В. Системы-на-кристалле. / В. Немудров, Г. Мартин // Проектирование и развитие. – Москва : Техносфера, 2004. – 216 с.
15. Бухтеев, А.В. «Методы и средства проектирования систем на кристалле» / А.В. Бухтеев // Chip news, 2003. – №4, С. 4 – 14.
16. Prokopenko, N.N. Logic functions representation and synthesis of k-valued digital circuits in linear algebra / N.N. Prokopenko, N.I. Chernov, V.Ya. Yugai, P.S. Budyakov // 2016. 24th Telecommunications Forum (TELFOR 2016). Belgrade, Serbia. 22-23 November, 2016. Pp. 1-4. DOI: 10.1109/TELFOR.2016.7818892.
17. Prokopenko, N.N. The Element Base of the Multivalued Threshold Logic for the Automation and Control Digital Devices / N.N. Prokopenko, N.I. Chernov, V.Ya. Yugai, N.V. Butyrlagin // on International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2017, Astana, Kazakhstan. 29-30 June, 2017. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998508.

REFERENCES

- [1] Dunaev V., Medvedovskij E. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya i kontrolya dlya atomnyh ehlektrostantsij [Automatic Control and Monitoring Systems For Nuclear Power Plants]. Control Engineering. Vol. 3 (45). 2013. pp. 22-31 (in Russian).
- [2] Hohlov C.V., Perspektivy razvitiya otechestvennoj radioehlektronnoj promyshlennosti [Prospects for the Development of the Domestic Electronics Industry]. Radio industry. 2014. Vol. 4, pp. 9-18.
- [3] Krasnikov G.Ya., Orlov O.M. Otlichitel'nye osobennosti i problemy KMOP-tehnologii pri umen'shenii proektnoj normy do urovnya 0,18 mkm i men'she [Distinctive Features and Problems of CMOS Technology with a Decrease in the Design Standard to a Level of 0.18 Microns and Less]. «Russian nanotechnology». 2008. Vol. 3. No. 7-8, pp. 124-128 (in Russian).
- [4] Bumagin A., Gulin Yu., Zavodskov S., Krivyakin V., Rutkevich A., Steshenko V., Suhorukov A., Shishkin O. Specializirovannyye SBIS dlya kosmicheskikh primenenij: problemy razrabotki i proizvodstva [Specialized VLSI for Space Applications: Problems of Development and Production]. ELECTRONICS: Science. Technology. Business. Vol. 1. 2010, pp. 50-56 (in Russian).
- [5] Wang Z. Current-Mode CMOS Integrated Circuits for Analog Computation and Signal Processing: A Tutorial. Analog Integrated Circuits for Analog Computation and Signal Processing, 1. 1991. P. 287-295.
- [6] Wayne K. Current-Mode Multiple-Valued Logic Circuits. IEEE. Journal of Solid-State. V.29. No 2, February 1994, P. 95-107.
- [7] Turgay T., Morgul A. Implementation of Multi-Valued Logic Gates Using Full Current-Mode CMOS Circuits. Analog Integrated Circuits and Signal Processing. May 2004. Volume 39. Issue 2. P. 191-204.
- [8] Chang Y.-H., Butler J. The design of current mode CMOS multiple-valued circuits. Proceedings of 21st International Symposium on 'Multiple-Valued Logic. Victoria. 1991. P. 130-138. DOI: 10.1109/ISMVL.1991.130718.
- [9] Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Butyrlagin N.V., Bugakova A.V. Perspektivy primeneniya novykh mikroskhem bazovogo matrichnogo i bazovogo strukturnogo kristallov v datchikovykh sistemah [Prospects for the Application of new Microcircuits of the Basic Matrix and Basic Structural Crystals In Sensor Systems]. SPIIRAN Proceedings. Vol. 2 (45). P. 157-171 (in Russian).
- [10] Malashevich D.B., Nedvoichnye sistemy v vychislitel'noj tekhnike [Non-Binary Systems in Computing]. Yubilejnaya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya «50 let modularnoj arifmetike» [Anniversary International Scientific and Technical Conference «50 Years of Modular Arithmetic»]. Zelenograd. 23-25 November. 2005. P. 599-613 (in Russian).
- [11] Chernov N.I., Yugai V.Ya., Prokopenko N.N., Butyrlagin N.V. Basic Concept of Linear Synthesis of Multi-Valued Digital Structures in Linear Spaces. Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013). Rostov-on-Don. Russia. September 27-30. 2013. Kharkov National University of Radioelectronics. P. 146-149.
- [12] Andreev A.S., Shuka A.A. Vozmozhnosti preodoleniya bar'era mezhsoedinenij v mikroehlektronike [Opportunities to Overcome the Interconnect Barrier in Microelectronics]. Zarubezhnaya radioe'lektronika [Foreign Radio Electronics]. 1986. No.10. P. 3-19 (in Russian).

- [13] Adamov Yu.F., Shishina L.Yu. *Proektirovanie sistem na kristalle* [Design of Systems on a Crystal]. Mosk. gos. in-t e'lektron. tekhniki (texn. un-t). Moskva : MIE`T [Moscow State Institute of Electronic Equipment (Technical Institute). Moscow. MIET]. 2005. 163 p. (in Russian).
- [14] Nemudrov V., Nemudrov V., Martin G. *Sistemy na kristalle* [System-on-Chip]. *Proektirovanie i razvitie* Moskva : Teknosfera [Design and Development. Moscow: Technosphere]. 2004. 216 p. (in Russian).
- [15] Buhteev A.V., Buhteev A.V. *Metody i sredstva proektirovaniya sistem na kristalle* [Methods and Tools for Designing Systems on a Chip]. *Chip news*. 2003. No. 4. P. 4-14 (in Russian).
- [16] Prokopenko N.N., Chernov N.I., Yugai V.Ya., Budyakov P.S. Logic functions representation and synthesis of k-valued digital circuits in linear algebra. 2016. 24nd Telecommunications Forum (TELFOR 2016). Belgrade. Serbia. 22-23 November 2016. P. 1-4. DOI: 10.1109/TELFOR.2016.7818892.
- [17] Prokopenko N.N., Chernov N.I., Yugai V.Ya., Butyrlagin N.V. The Element Base of the Multivalued Threshold Logic for the Automation and Control Digital Devices. On International Siberian Conference on Control and Communications. SIBCON-2017. Astana. Kazakhstan. 29-30 June. 2017. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998508.

The Current Digital Logical Elements and IP-Modules for Problems of Automatic Control and Monitoring of Nuclear Objects

N.V. Butyrlagin^{*1}, N.I. Chernov^{*2}, N.N. Prokopenko^{*,3}, A.V. Bugakova^{*4}**

^{*} Don State Technical University, Gagarin sq. 1, Rostov-on-Don, Russia, 3440000

¹ORCID iD: 0000-0002-6363-5113

WoS Researcher ID: B-9159-2014

Scopus Author ID: 55975353700

e-mail: nbutyrlagin@mail.ru

²ORCID iD: 0000-0002-2438-4825

WoS Researcher ID: S-3745-2016

Scopus Author ID: 56434029200

e-mail: chernovni@yandex.ru

⁴ORCID iD: 0000-0001-9255-0015

WoS Researcher ID: E-6820-2014

Scopus Author ID: 56543776600

e-mail: annabugakova.1992@mail.ru

^{*} Don State Technical University, Gagarin sq. 1, Rostov-on-Don, Russia, 3440000

^{**}Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences (IPPM RAS)

Sovetskaya st. 3, Zelenograd, Russia, 124681

³ORCID iD: 0000-0001-8291-1753

WoS Researcher ID: I-6599-2013

Scopus Author ID: 25227786700

e-mail: prokopenko@sssu.ru

Abstract – The paper considers the features of designing a special electronic component base (ECB) for automatic control systems and control of nuclear power plants. Unlike classical potential digital devices, ECB of this class is based on the properties of current logic elements (CLE). A more complete and systematic presentation of the main provisions of the CLE synthesis is given. The synthesis process of functions of the main functionally complete system using sets of logical arithmetic and logical operations is described. Directions for further research in the field of current ECB are formulated. Linear representations of logical functions of Boolean and linear algebra are discussed for two-valued and three-valued logics. The basic components of CLE are considered. The schemes that implement logical operations in various bases - “truncated difference”, “difference modulus”, “comparison” as well as their combinations are presented. The advantages of CLE compared with potential digital logic elements are shown.

Keywords: electronic component base, automatic control systems, digital current structures, logic elements, representations of logical functions, two-digit logic, three-digit logic, reliability.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК: 621.039.5:004

**СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ
В ФИЗИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ ЯЧЕЕК ВВЭР В СУТОЧНОМ
ГРАФИКЕ МАНЕВРИРОВАНИЯ ДВУМЯ ПРОГРАММАМИ
GETERA И WIMS**

© 2019 Рахман С.К. Анисур, М.А. Увакин

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Работа ориентирована на решение реальных задач реактора ВВЭР. Решается проблема моделирования ТВЭЛа и ТВЭЛа с гадолинием в ВВЭР, а именно, анализируется на какое количество расчётных слоёв необходимо разбивать топливный стержень и топливо с гадолиниевым стержнем. Работа содержит зависимость отклонения коэффициента размножения нейтронов от выгорания. Для решения данных задач использовались программы GETERA-93 и WIMS. Для подготовки данных была использована SIMPLE FORTRAN.

Ключевые слова: топливный стержень, выгорание, топливная зона, топливный стержень с гадолинием (ТВЭГ), GETERA-93, SIMPLE FORTRAN.

Поступила в редакцию 09.01.2019

После доработки 27.02.2019

Принята к публикации 01.03.2019

1. Introduction

In first article [<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1133/1/012048>] it was showed that in fuel rod only one zone is sufficient but in fuel with gadolinium rod five zones are needed. In this article fuel zone (in the fuel rod) and fuel with gadolinium zone (in the fuel with gadolinium rod) are divided about five sub-zones and tried to prove the first article by another program WIMS. The WIMS program (Winfrith Improved Multigroup Scheme) is designed to calculate the neutron-physical characteristics of reactor cells on thermal neutrons, including burnout calculations. The program uses its own 69-group library of micro constants. A characteristic feature of the program is a two-step approach to the calculation of the spatial energy distribution of neutrons in a cell. At the first stage, a detailed spectrum is calculated in 69 groups in each of the zones specific for the cell (PIN-CELL): fuel, shell, coolant, and retarder, which is shown in the Figure 1. The collision probability method is used.

On the second stage- the sections are reduced to a certain small-scale approximation, in which spatial distributions of neutrons along the cell are calculated. At the same time, it is possible, if desired, to choose either the method of discrete ordinates or the collision probability method. Further, the solution, taking into account the leakage, is modified and small-scale flows unfold into 69 groups to calculate the reaction rates of the given isotopes. The collision probability method is implemented in WIMS to solve the transport equation in one-dimensional cylindrical geometry.

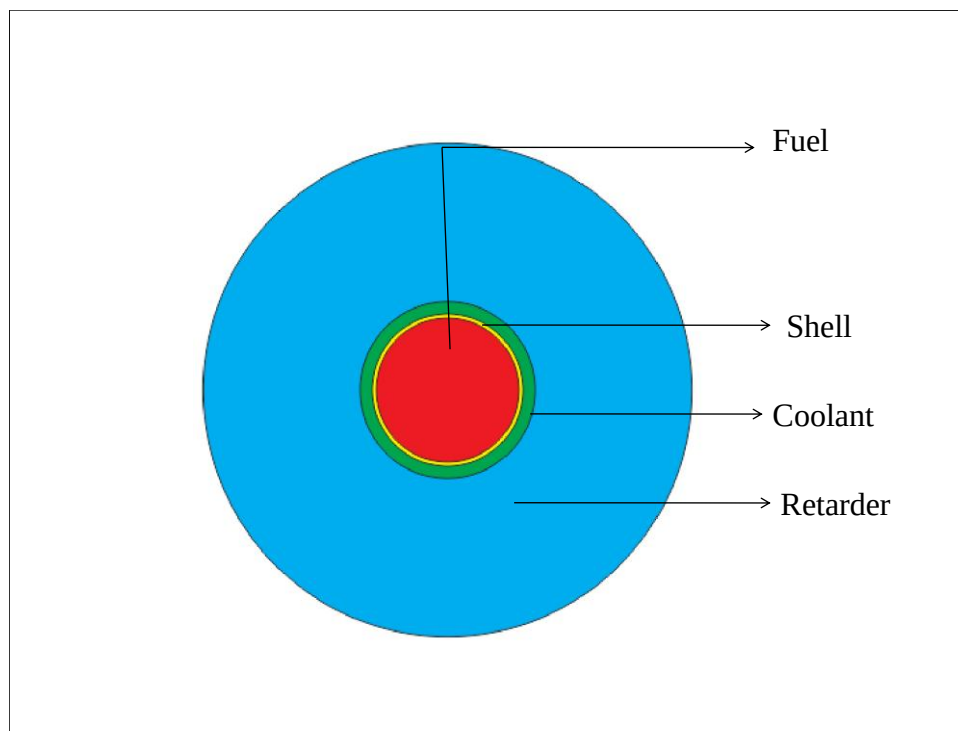


Fig. 1 – Pin cell

2. State of the problem

At present, the possibility of working in a maneuverable load mode is considered as one of the promising competitive advantages of modern projects of water-and-water power reactors. Therefore, the rationale for the security of the reactor installation. When working in maneuver mode is an urgent task. A feature of this operating mode of the reactor is a change in power, which in turn leads to a constant change in other neutron-physical and thermal-hydraulic parameters during the process. Therefore, in justifying the security of the reactor installation, the problem arises of choosing the most unfavorable time for the origin of the initial event.

As a result, it is possible to obtain the dependence of the criteria parameters as a function of the regulatory parameters. This allows us to analytically solve the problem of finding an extremum with allowance for a given space of values of the regulatory parameters for the maneuvering period. As a result, the most unfavorable initial state and the corresponding moment of time are determined, when the occurrence of the initial event will be the most conservative. Since the calculation of all possible states is rather difficult, the development of this technique seems to be an urgent task.

Maneuvering is a process in which change the power of a reactor. In the pick hour, reactor needs to work by 100% power, but in the off pick hour need to change the power of a reactor. For this reason, at the present time maneuvering load mode is considered one of the most advantages for the VVER power reactors. One the other hand maneuvering is very important for the safety assessment. For the maneuvering and without maneuvering regime mode is shown below.

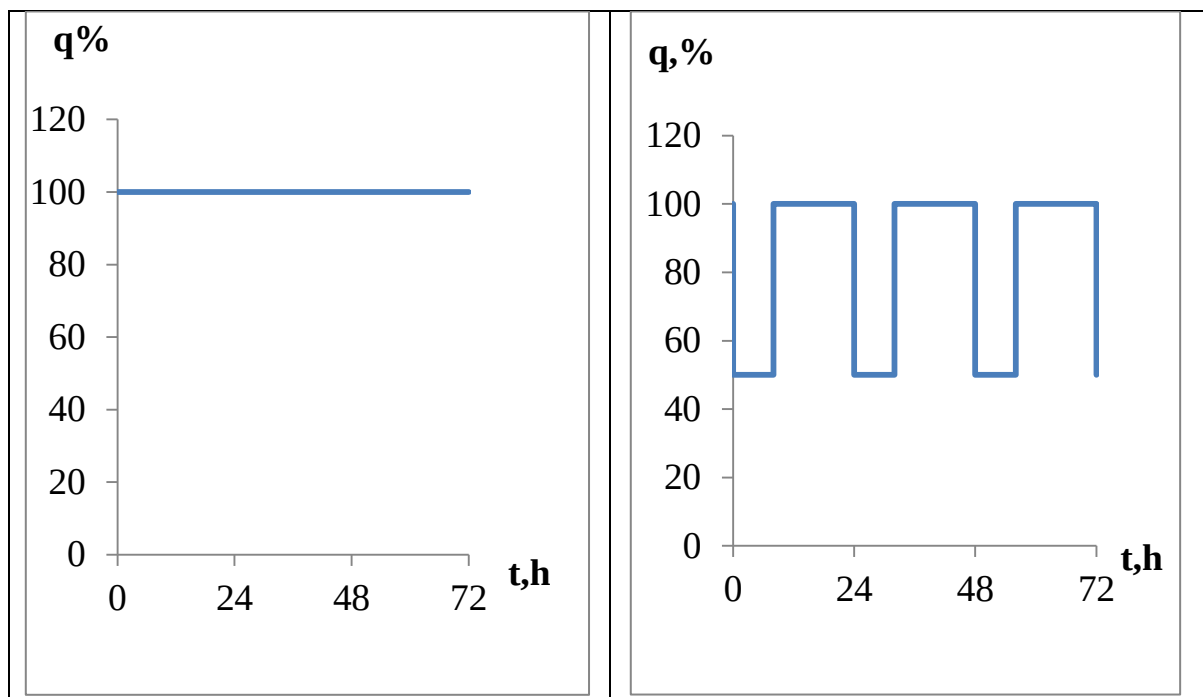


Fig. 2 – Without maneuvering and with maneuvering mode

In pick hour reactor work by 100% power (Figure 2- Left). On the other hand, in off pick hour, 8 hours reactor works by 50% power and 16 hours work by 100% power (Figure 2- Right).

3. Description of the calculation model

The Winfrith improved multigroup scheme (WIMS) is a general code for reactor lattice cell calculation on a wide range of reactor systems. In particular, the code will accept rod or plate fuel geometries in either regular arrays or in clusters and the energy group structure has been chosen primarily for thermal calculations. The basic library has been compiled with 14 fast groups, 13 resonance groups and 42 thermal groups, but the user is offered the choice of accurate solutions in many groups or rapid calculations in few groups. Temperature-dependent thermal scattering matrices for a variety of scattering laws are included in the library for the principal moderators which include hydrogen, deuterium, graphite, beryllium and oxygen.

The treatment of resonances is based on the use of equivalence theorems with a library of accurately evaluated resonance integrals for equivalent homogeneous systems at a variety of temperatures. The collision theory procedure gives accurate spectrum computations in the 69 groups of the library for the principal regions of the lattice using a simplified geometric representation of complicated lattice cells. The computed spectra are then used for the condensation of cross-sections to the number of groups selected for the solution of the transport equation in detailed geometry. The solution of the transport equation is provided either by use of the Carlson DSN method or by collision probability methods. Leakage calculations including an allowance for streaming asymmetries may be made using either diffusion theory or the more elaborate B1-method. The output of the code provides eigenvalues for the cases where a simple buckling mode is applicable or cell-averaged parameters for use in overall reactor calculations. Various reaction rate edits are provided for direct comparison with experimental measurements.

Isotope ^{238}U is described in the library by the recommended nuclide 2238 and has three

versions with different tables of resonance parameters - 2238.2, 2238.3, 2238.4. Resonance tables 2238.2 were obtained from the UKNDL files, which are close to the corresponding ENDF / B-4 data. Correction of this nuclide by the authors in the direction of decreasing the resonant integral uniformly in all groups outside the connection with the files of the estimated data led to the nuclide 2238.4. Calculations with its use gave more satisfactory results on the criticality of experimental assemblies. In the library there are two versions of the resonance tables of the ^{235}U - 235.2 and 235.4 isotope. The authors recommend to use nuclide 235.4. Source of nuclide 235.2 is the UKNDL estimated data system. Nuclide 235.4 differs from the nuclide 235.2 by a correction toward a decrease in the fission source in the resonant groups by $\sim 15\%$.

In the reactor active zone has 163 fuel assemblies. In every fuel assembly contains 312 fuel rods (Fig-3). 312 fuel rods are divided into four types. 1) Fuel rod, which only contains ^{235}U fuel. 2) Fuel with gadolinium rod, which contains $^{235}\text{U} + \text{Gd}$. (Percentage of gadolinium is shown in the table. 3) Central rod, which contains Fe, Sn, Nb, Zr alloy. 4) Guide channel, which also contains the same alloy.

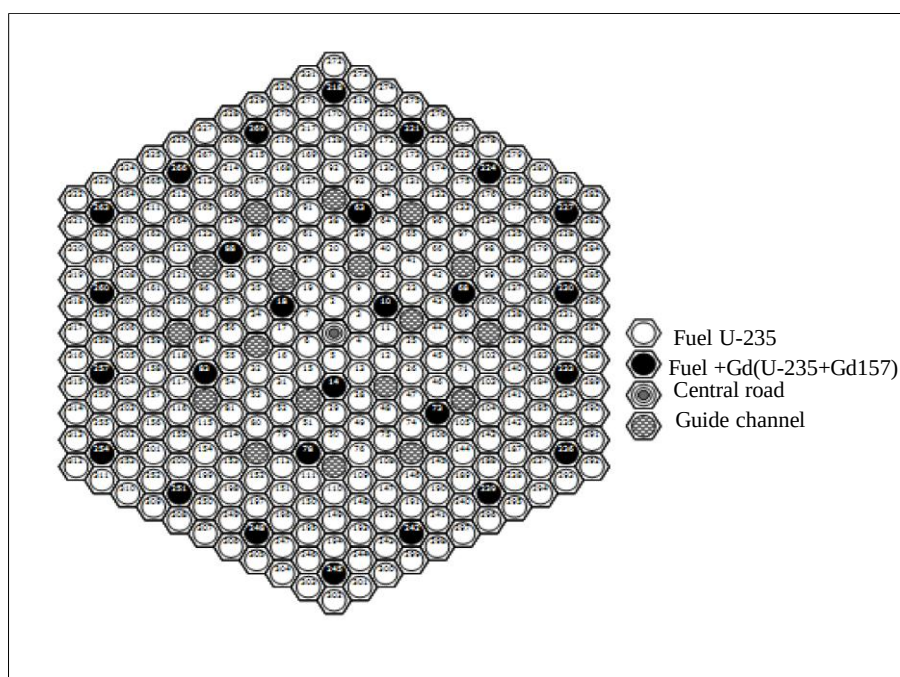


Fig. 3 – 312 fuel rods assembly

Table 1 – Characteristics of fuel U235 and gadolinium Gd

Fuel assembly type	Average fuel enrichment ^{235}U , wt. %	The number of fuel rods of various types and their enrichment, ^{235}U , weight. %	Characteristics of fuel cells with gadolinium		
			Number of fuel with gadolinium	Fuel enrichment of fuel with gadolinium, ^{235}U , weight. %	Content Gd ^{235}U , weight. %
Fuel assembly Type-1	4,93	306/4,95	6	4,0	8
Fuel assembly Type-2	4,33	285/4,40	27	3,6	8
Fuel assembly Type-3	4,87	285/4,95	27	4,0	8

Every fuel rod and fuel with gadolinium rod is divided by four zones which are in Figure 1. In this article, 7 fuel rods taken from 312 fuel rods and calculated simple model by

the program WIMS. Which is drawn in the Figure 4(left) and Figure 5(left). Central fuel rod (U^{235}) is surrounded by six fuel (U^{235}) rods which is in figure 4 (left). Central fuel with gadolinium rod is surrounded by six fuel (U^{235}) rods which is in figure5 (left). Central fuel rod and fuel with gadolinium rod are divided into five sub-zones, which is shown in the figure 4 (right) and figure 5 (right) respectively.

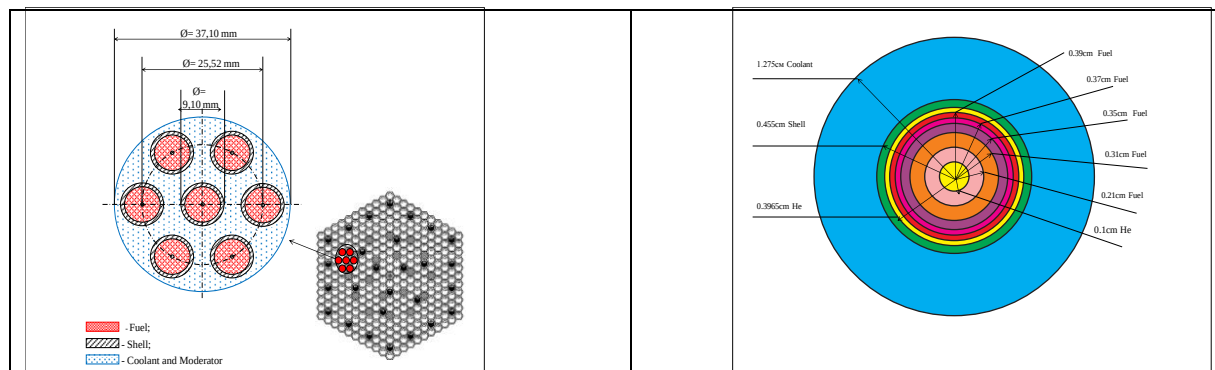


Fig. 4 –The central fuel rod is surrounded by six fuel rods (left) and the central fuel rod is divided by five sub-zones (right)

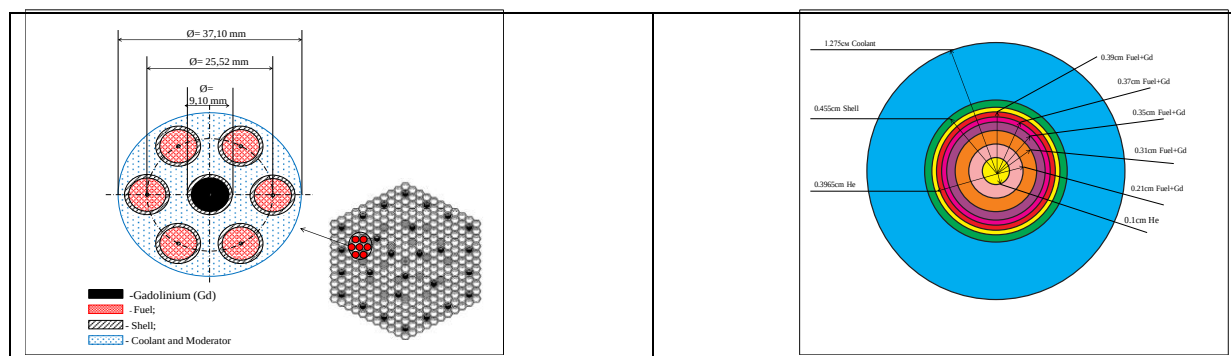


Fig. 5– Fuel with gadolinium rod surrounded by six fuel rod (left) and Central fuel with gadolinium rod is divided by five sub-zones (right)

4. Calculation of the result

When in the fuel rod only one zone is fuel Figure 1, then the deviation of the multiplication coefficient vs burnup which is calculated by the program WIMS shown in the Figure-6. This calculation for the fuel assembly type-1 (when in the Fuel assembly has 6 fuels with gadolinium rods and enrichment of uranium 4.95%).

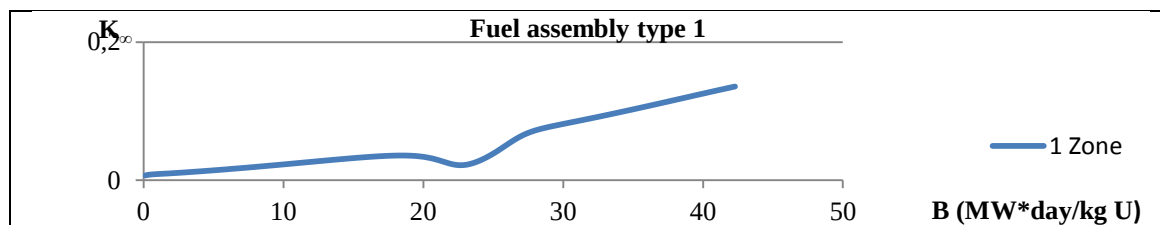


Fig. 6 – Deviation of multiplication coefficient VS burnup, when in the fuel rod only one zone is fuel (fuel assembly type 1)

But when the fuel zone was divided into five subzones is in Figure 4 (right) then the deviation of the multiplication coefficient vs burnup which is calculated by the program WIMS and GETERA-93 shown in the Figure 7 (A). But in this Figure 7(A), the calculated result showed that the presence of additional fuel zone (2, 3, 4 and 5) the deviation of multiplication coefficients are not changed by the program WIMS and GETERA-93 respectively.

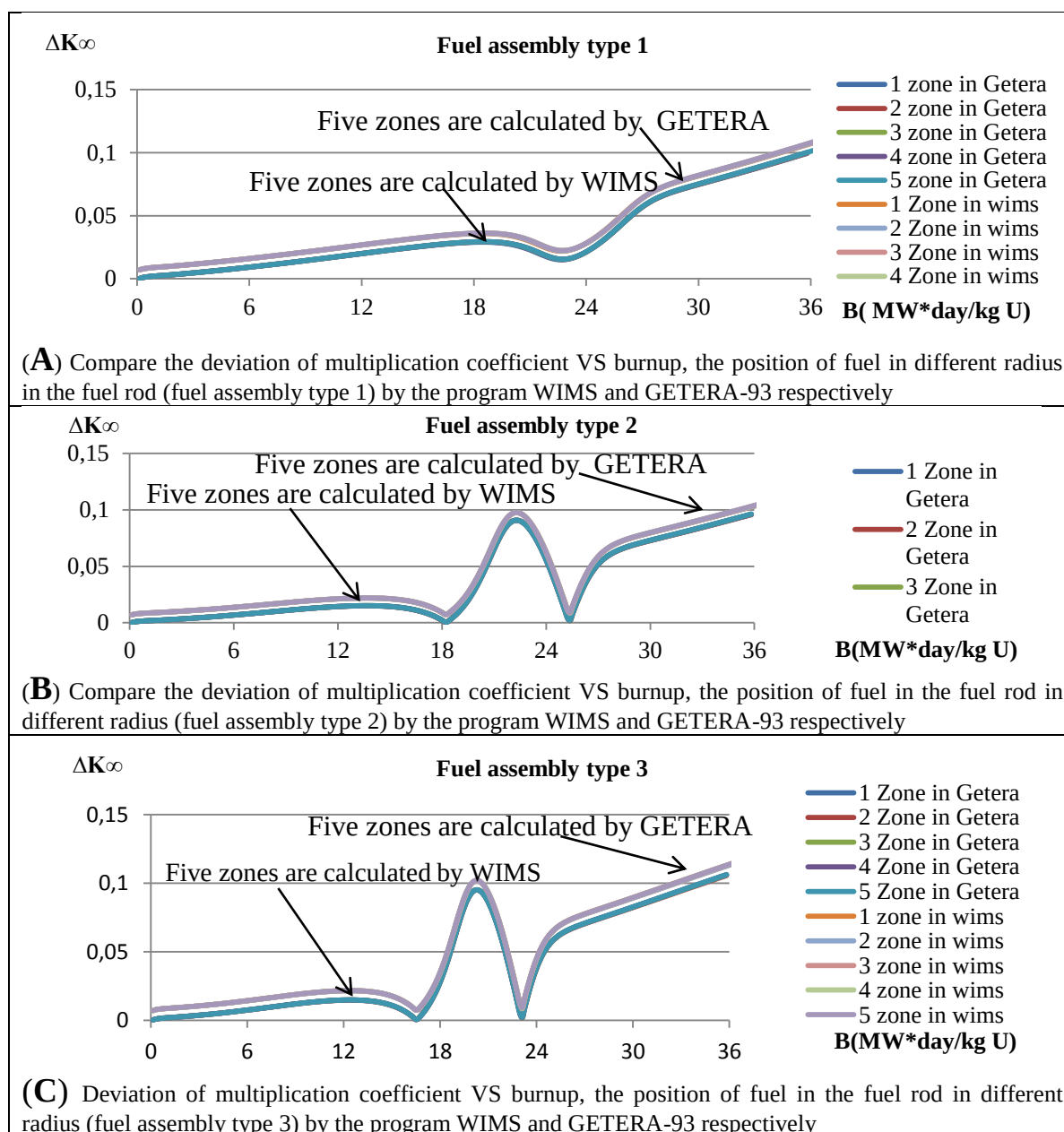


Fig. 7 – Deviation of multiplying coefficient VS burnup for different types of fuel assembly

In the Figure-7 (B), for the fuel assembly (FA) type-2 (when in the Fuel assembly has 27 fuels with gadolinium rods and enrichment of uranium 4.4%) and in the Figure -7 (C), the fuel assembly type- 3 (when in the Fuel assembly has 27 fuels with gadolinium rods and enrichment of uranium 4.95%) were the same result. The same result means: - Presence of additional fuel zone in the fuel rod Figure 4 (right), deviation of multiplication coefficients are not changed. It was calculated by the WIMS and GETERA-93 accordingly.

On the other hand, when the fuel with gadolinium rod zone was divided into five sub-zones Figure-5 (right) and put the fuel with gadolinium, then the deviation of multiplication coefficient vs burnup which is calculated by the program WIMS and GETERA-93 shown in the Figure-8 (A). But in this calculation it is shown that the presence of additional fuel with gadolinium zone (2, 3, 4, and 5), the deviation of multiplication coefficients are decreasing. This result for the fuel assembly type-1 (when in the Fuel assembly has 6 fuels with gadolinium rods and enrichment of uranium 4.95%).

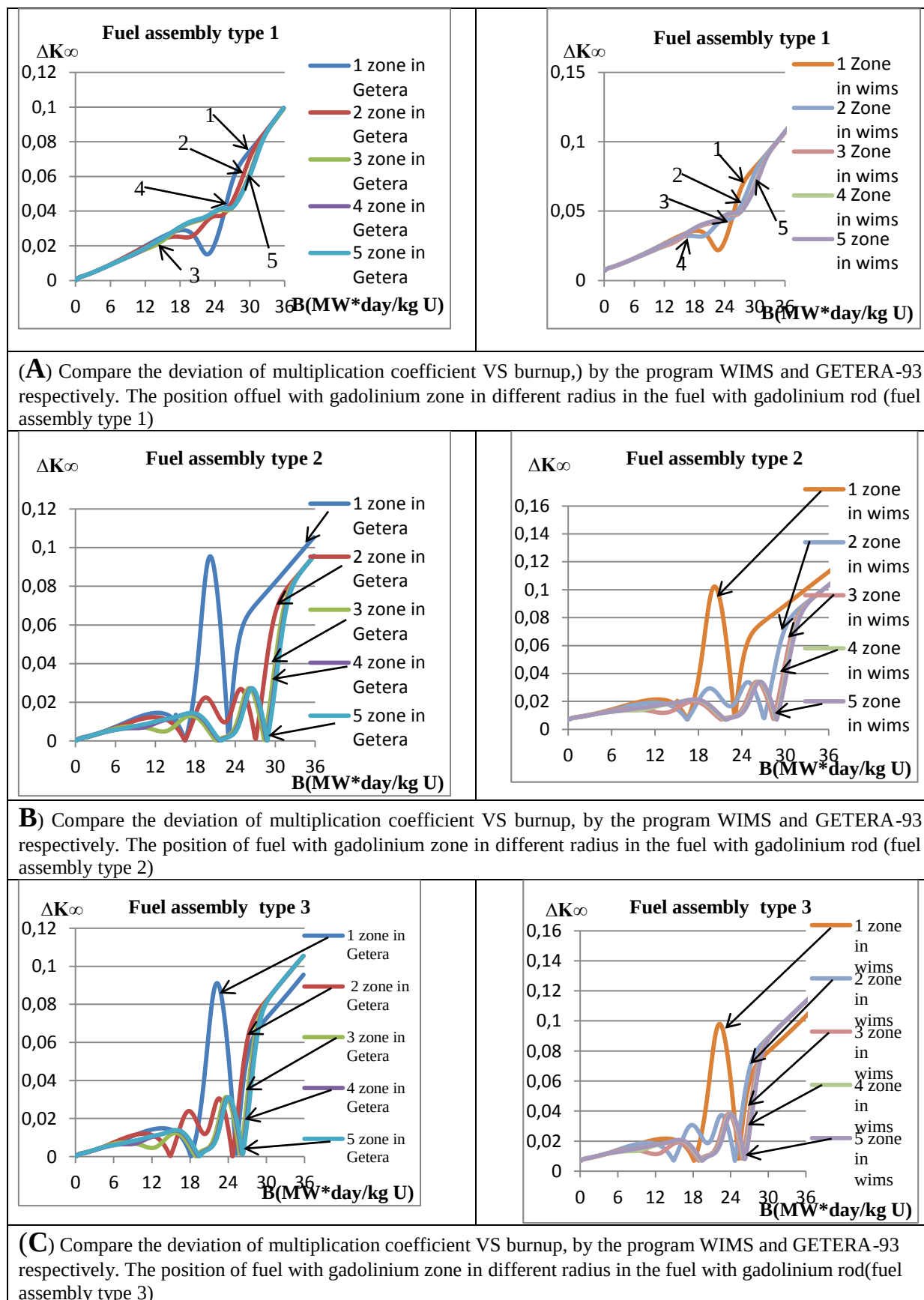


Fig. 8 – Deviation of multiplying coefficient VS burnup for different types of fuel assembly

In Figure 8 (B) – for the fuel assembly (FA) type – 2 (when in the Fuel assembly has 27fuels with gadolinium rods and enrichment of uranium 4.4%) and in the Figure 8 (C) – for the fuel assembly type – 3 (when in the Fuel assembly has27 fuels with gadolinium rods and enrichment of uranium 4.95%) were the same results. The same result means-Presence of the additional fuel with gadolinium zone in the fuel with gadolinium rod, the deviation of multiplication coefficients are decreasing. It was calculated by the program WIMS and GETERA-93 accordingly.

5. Calculate the fuel temperature reactivity coefficient by WIMS and GETERA-93

Research workwas applied in the field of fuel temperature reactivity coefficient vs burnup, which is shown in the Figure-9.

5.1 Without maneuvering step:

Burnup for the 300 days- when the temperature was 1000k, then the multiplication coefficient $K_{\infty 1}$ was calculated by the program WIMS and GETERA-93 respectively. After that, the temperature was changed to 990k and again the multiplication coefficient $K_{\infty 2}$ was calculated by the program WIMS and GETERA-93 accordingly. In the next step, the fuel temperature coefficient αT_{fuel} calculated by the using formula $\alpha T_{fuel} = \frac{\Delta \rho}{\Delta T} = (\frac{1}{k_{\infty 1}} - \frac{1}{k_{\infty 2}}) / (T_2 - T_1)$.

5.2 Maneuvering step:

In the same way, the maneuvering step was calculated. But in the fuel temperature reactivity coefficient (αT_{fuel}) is always negative. To calculate this condition the next steps were followed. Firstly, one burnup and his multiplication coefficient $K_{\infty 1}$ was taken in the output file from the fuel assembly type (1). This multiplication coefficient was the density (ρ).Secondly, this density (ρ) was put in the input file with temperature 990k and calculated the multiplication coefficient $K_{\infty 2}$.In the same way;7 points were calculated by the program Getera and WIMS accordingly. Then the calculated result of fuel temperature reactivity coefficient (αT_{fuel}) vs burnup which is drawn in figure 9.

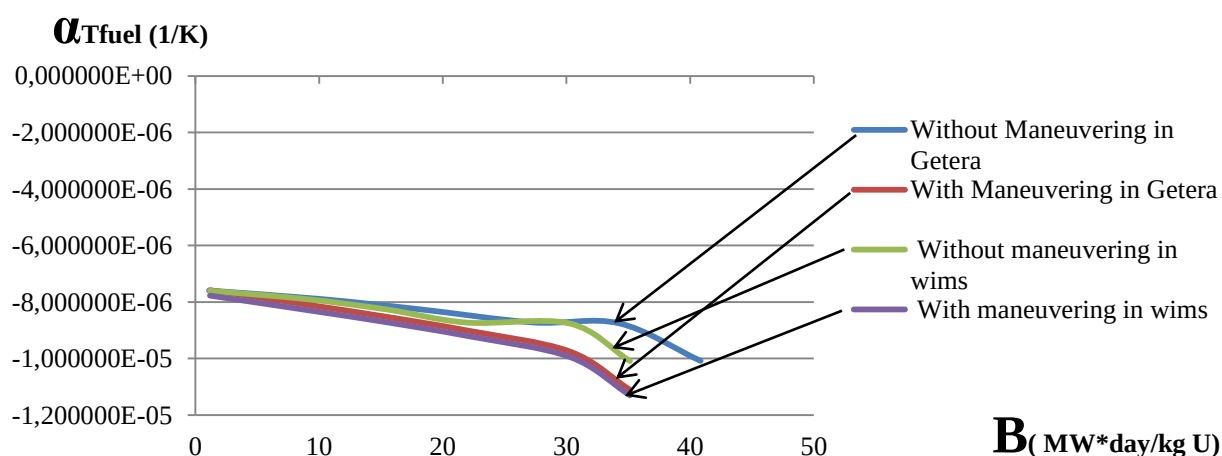


Fig. 9 –Compare the fuel temperature reactivity coefficient VS burnup by the program WIMS and GETERA-93 respectively

6. Result analysis

6.1 Compare the program Getera and Wims

Generation of neutrons ($\nu_f \Sigma_f$)₂ vs burnup without maneuvering and with maneuvering and multiplication coefficient vs burnup. It was calculated by the program Getera and WIMS which shown in the Figure 10 (A) and Figure 10 (B) accordingly. On the other hand deviation between without maneuvering and with maneuvering which is shown the Figure 10 (C).

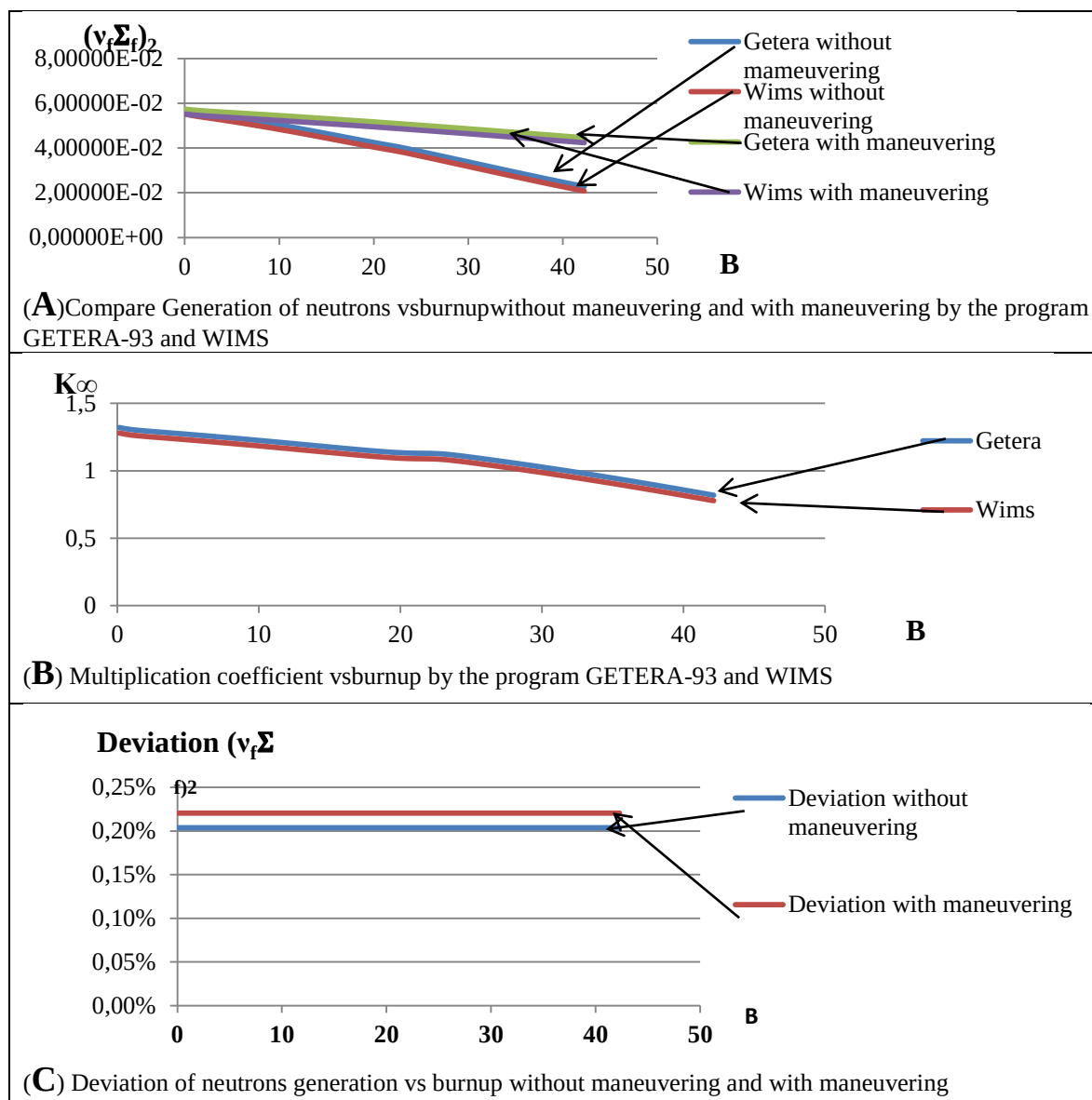


Fig. 10 – Compare the program Getera and Wims

In figure 10 (B) the program GETERA-93 and WIMS showed the same characteristics. In figure 10 (C) it is shown that deviation of without maneuvering and with maneuvering are the same. That means, the program Getera and Wims are calculated the general code for reactor lattice cell on a wide range of a reactor but they have their own library system.

6.2 For the fuel rod

In Figure 6,7(A),7(B),7(C) – the result for the same burnup was calculated, but it is known that burnup time is not the same for the maneuvering and without maneuvering mode. For this reason, the peak was shown. But in the Figure 6 and Figure 7(A) – peak is small than

the fuel assembly type-2 Figure 7(B) or fuel assembly type-3 Figure 7(C). Because fuel assembly (FA) (type-1) has 6 fuel with gadolinium rods. For this, burnup time is smaller than the fuel assembly type-2 or fuel assembly type-3. On the other hand Figure 7(B) in fuel assembly type-2, and Figure 7(C) fuel assembly type-3, has 27 fuels with gadolinium rods. For this reason, the difference of burnup time is greater than the fuel assembly type-1. For this reason, in these two figures, the big peak was shown. Presences of additional fuel zones in the fuel rod, the deviation of multiplication coefficients are not changed. Because, the fuel rod has not gadolinium fuel. For this reason, fuel may be burned more evenly.

6.3 For the fuel with gadolinium rod

For the same reason, the small peak Figure 8(A) and the big peak Figure 8(B) and Figure 8(C) were the presence, which is discussed in the above. But in the fuel with gadolinium rod presence of additional fuel with gadolinium zone, the deviations of multiplication coefficients are decreasing. Because, more gadolinium fuel rod absorbed the more neutrons, so ΔK_{∞} decreasing.

6.4 Reactivity coefficient of the fuel temperature

In figure 9 it is the reactivity coefficient of the fuel temperature vs burnup figure. In the reactor core when the temperature is increasing at that time U^{238} more absorbed the neutron and energy is decreasing. For this reason, temperature reactivity coefficient is always negative. It is a very important parameter for the reactor. Because, if the temperature in the reactor core is increased, then the negative reactivity is added to the core. This negative reactivity decreases the thermal power. In this time the reactor power stabilizes itself and stays safe.

7. Result

The program GETERA-93 and WIMS allows the model conditions of neutron-physics experiments correctly and calculates the measured parameters: reaction rates, resonance integrals, multiplication coefficient and various indices. They give the same result but a little bit different. Because every program have their own library system. Result of WIMS has a good agreement with the result of GETERA-93. For this reason at last it may be say that first work was correct.

8. Conclusion

In the present work, it was found that when creating a design model of the VVER reactor fuel assembly, then in the fuel rod only one fuel zone is sufficient, but five zones are needed in the fuel with gadolinium rod. If used more than five zones in the fuel rod or the fuel with gadolinium rod, the result will not change, but the calculation will be more complicated. In this work two programs are used but it was found that results are the same. At long last it seems that this research work is more correct which is proved by two programs.

REFERENCES

- [1] Shotikov A.V., Savchenko V.E., Vigranenko Yu.M., Khrustalev V.A. Puti sovershenstvovaniya vodno-khimicheskogorezhimavtorogokontura AES s VVER-1000 [Ways to Improve Water-Chemical Mode of the NPP Second Circuit with WVER-1000] [News of Tomsk Polytechnic University]. 2008. V. 312. № 2. P. 39-43 (in Russian).
- [2] Averyanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B., Filimonov P.E. Temperaturnoye Rregulirovaniye i manevrentnost VVER-1000 [Temperature Regulation and

- Maneuverability of WWER-1000] [Atomic Energy]. 2002. V.109, № 4. P. 246-251(in Russian).
- [3] Yerak D.Yu., Kochkin V.N., Zhurko D.A., Panfyorov P.P. Modernizatsiya program obratsovsvideteley VVER-1000 [Modernization of Samples Witnesses Programs WWER – 1000] [History of Science and Technology]. 2013. № 8. P. 142-152 (in Russian).
- [4] Shkarovsky A.N., Aksenov V.I., Serdun N.P. Analizfizicheskikh sostoyaniy reaktora VVER-1000 i upravleniyeavariynymisituatsiyami [Analysis of Physical States of WWER-1000 Reactor and Control of Emergency Situation] [Proceedings of Higher Educational Institutions]. [Nuclear power]. 2005. № 3. P. 60-68 (in Russian).
- [5] Getya S.I., Krapivtsev V.G., Markov P.V., Solonin V.I. [and others] Modelirovaniye temperaturnykh neunifikatorov v elemente toplivno-elementnogo topliva topliva-VVER-1000 [Modeling Temperature Nonuniformities in a Fuel-Element Bundle of WWER-1000 Fuel Assembly] [Atomic Energy]. 2013. V.114.№ 1. P. 69-72 (in Russian).
- [6] Melikhov V.I., Melikhov O.I., Yakush S.E. [and others] Issledovaniye razresheniya borona v reaktore VVER-1000[A Study of Boron Dilution in WWER-1000 Reactor] [Thermal Engineering]. 2002. V 49. № 5. p. 372-376.
- [7] Filimonov P.E., Averyanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B., Semchenkov Yu.M. Rabota VVER-1200/1300 v sutochnom grafike nagruzki [WWER-1200/1300 Operation in the Daily Load Schedule] [Atomic Energy]. 2012. V.113. Issue 5. P. 247- 252 (in Russian).
- [8] Filimonov P.E., Averyanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B., Semchenkov Yu.M. Temperaturnoyeregulirovaniye i manevrennost' VVER-1000 [Temperature Regulation and Maneuverability of the WWER-1000] [Atomic Energy]. 2010.V.109. issue.6.P.198-202 (in Russian).
- [9] Malyshev A.B., Efanov A.D., Kalyakin S.G. Eksperimentalnyye issledovaniya sistemy dlya passivnogo napolneniya reaktora VVER-1000 [Experimental Investigations of the System for Passive Flooding of WWER-1000 Reactor]. [Thermal Engineering]. 2002. V. 49. № 12. P. 1032-1037 (in Russian).
- [10] Vokhmyanina N.S., Zlobin D.A., Kuznetsov V.I., Lagovsky V.B. [and others] Metod offset moshchnost noyfazovoy diagrammy dlya upravleniya energovydeleniyem reaktora [Offset-Power Phase Diagram Method for Control of Reactor Energy Release] [Atomic Energy]. 2016. V.121. Issue 3. P.123-127 (in Russian).

Compare the Result of Uncertainty Analysis in the Physical Calculations of WWER Cells in the Daily Maneuvering Schedule by GETERA and WIMS Programs

Rahman S.K. Anisur¹, M.A. Uvakin²

National Research Nuclear University (MEPhI), City-Moscow, Kashira Highway, House-31, 115409

¹ORCID iD: 0000-0001-7803-8234

Wos Researher ID: D-3381-2019

e-mail: ranisur01@gmail.com

²ORCID iD: 0000-0002-4917-1770

Wos Researher ID: E-1027-2019

e-mail: uvakin_ma@grpress.podolsk.ru

Abstract – This work is focused on solving real problems of a WWER reactor. The problem of simulating a fuel rod and a fuel rod with gadolinium in WWER is solved, exactly, it is analyzed for how many design layers is necessary in the fuel rod and fuel with gadolinium rod. The work contains the dependence of the deviation of the multiplication factor of neutrons from burnout. To solve these problems, the GETERA-93 and WIMS programs are used. SIMPLE FORTRAN was used for data preparation.

Keywords: Fuel rod, burn up, fuel zone, fuel rod with gadolinium. GETERA-93, SIMPLE FORTRAN.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.86.06

**ВАРИАНТ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ УСТРОЙСТВА
ТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ЗАХВАТА ДЛЯ ПОДЪЕМА
УПАВШИХ КАССЕТ В РЕАКТОРЕ ТИПА ВВЭР**

© 2019 П.Д. Кравченко*, Д.Н. Федоренко**, Ю.П. Косогова*

**Волгодонский инженерно-технический институт – филиал научного исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия*

***ООО «Атомспецсервис», Волгодонск, Ростовская обл., Россия*

Рассмотрен вариант схемы точного позиционирования подвешенного устройства для наведения на упавшую в реактор типа ВВЭР кассету. Схема предложена вместо применяемого грузоподъемного устройства с длинными телескопическими звеньями.

Ключевые слова: точное позиционирование, грузоподъемное устройство, канатный подвес, сдвоенный полиспаст.

Поступила в редакцию 12.02.2019

После доработки 21.02.2019

Принята к публикации 28.02.2019

Известные конструктивные схемы канатных полиспастов не могут обеспечить благоприятные условия набегания каната на барабан и с барабана на блок при фиксированных осях верхних блоков. Это приводит к износу, как самого подъемного каната, так и боковых сторон (ручьев) неподвижных блоков полиспаста, особенно в случаях, когда приводной подъемный барабан расположен близко к блокам полиспаста [1-4].

Кроме того, в особых случаях, например, при работе подъемного устройства в радиоактивной зоне по безлюдной технологии, когда требуется высокая точность неоднократного наведения подвижного блока полиспаста с захватным устройством на объект, существующая конструктивная схема не сможет обеспечить требуемую точность.

Существующая конструкция машины перегрузочной МП1000 [5-11] позволяет обеспечить необходимую точность ± 2 мм наведения исполнительного органа на объект, используя прямолинейное удлинение элементов жесткой телескопической рабочей штанги.

Поведение гибкого канатного подвеса при перемещении его в воде по вертикали на сдвоенном полиспасте пока не исследовано.

Можно предположить, что при неподвижных верхних блоках подъемного устройства, наведенного на координаты объекта, опускание подвижных нижних блоков подвешенного устройства будет происходить не строго по вертикали в связи с разными усилиями в канатах на набегающей и сбегавшей ветвях, связанными с потерями в блоках подвески, хотя и незначительными.

С другой стороны, набегание каната на верхний блок полиспаста под различными углами девиации при наведении на объект тоже может оказать влияние на величину отклонения подвешенного устройства от вертикали, предположительно тоже

незначительное. Требуемая точность наведения может быть обеспечена применением специальных направляющих посадочных поверхностей подвешного устройства для его точной посадки на объект.

Исследование процесса перемещения подвешного устройства в этих случаях является, очевидно, необходимым.

Утверждать о требуемой точности наведения ± 2 мм в этом случае нет оснований. Нужна экспериментальная проверка в лабораторных и производственных условиях.

Однако устранить влияние девиации каната при сбегании с длинного барабана на верхний блок полиспаста при большой глубине расположения упавшей кассеты можно с применением простого конструктивного решения.

Предлагаемое устройство представлено на рисунке 1.

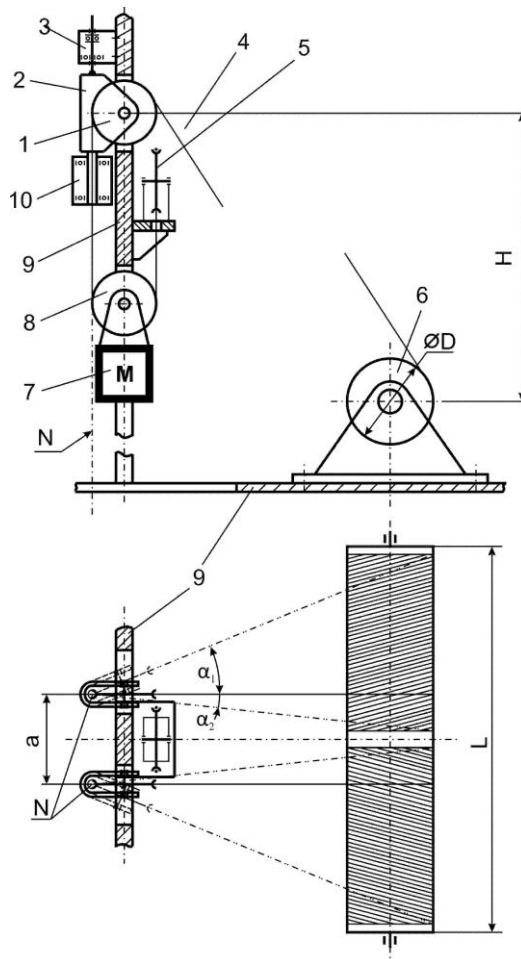


Рисунок 1 – Устройство точного позиционирования при наведении на координаты устройства на канатном подвесе в двойном полиспасте: 1 – верхний блок; 2 – обойма поворотная; 3 – опора верхняя; 4 – канат; 5 – блок уравнивающий; 6 – барабан приводной; 7 – устройство захватное с дополнительным грузом **М**; 8 – блок нижний подвижный; 9 – базовая опорная конструкция; 10 – опора нижняя; **a** – расстояние между осями верхнего и нижнего блоков полиспаста; **N** – оси канатов сдвоенного полиспаста; α_1, α_2 – углы отклонения (девиации) набегания каната с подъемного барабана на блоки; **М** – дополнительная нагрузочная масса; **H** – расстояние между осями верхнего блока 1 и подъемного барабана 6; $\varnothing D$ – диаметр подъемного барабана; **L** – длина подъемного барабана [A device for precise positioning when pointing to the coordinates of the device on a cable suspension in a double chain hoist: 1 – upper unit; 2 – swivel holder; 3 – upper support; 4 – rope; 5 – balancing unit; 6 – drive drum; 7 – gripping device with additional load **M**; 8 – lower moving unit; 9 – basic support structure; 10 – lower support; **a** – the distance between the axes of the upper and lower blocks of the chain hoist; **N** – axes of the ropes of the double tackle; α_1, α_2 – angles of deviation of the rope running from the lifting drum onto the blocks; **M** – additional loading weight; **H** – the distance between the axes of the upper unit 1 and the lifting drum 6; $\varnothing D$ – diameter of the lifting drum; **L** – the length of the lifting drum]

Верхний неподвижный блок 1 установлен в обойме 2, смонтированной на опорах 3 и 10, жестко прикрепленных к несущей металлоконструкции 9.

Канат 4 сдвоенного полиспаста сходит с приводного барабана 6, обходит один верхний блок 1, нижний блок 8, уравнивающий блок 5, возвращается обратно через другие парные блоки 8 и 5, далее – на барабан 6 диаметра $\varnothing D$.

К нижнему подвижному блоку 8 подвешено устройство 7 захвата объекта с дополнительным грузом массой M , обеспечивающей вертикальное перемещение по осям N .

Оси опор 3 и 10 неподвижного блока 1 расположены на расчётном расстоянии от оси симметрии сдвоенного полиспаста так, что при любом смещении каната по приводному барабану под углами девиации α_1 и α_2 они совпадают с осями N сбегания или набегания каната на блоки 1.

Кроме того, канаты проходят через направляющие отверстия в блоке 10 и опоре блока 5 так, что расстояние a между двумя вертикальными осями N канатов всегда будет постоянным, а канат не будет испытывать дополнительных деформаций и напряжений при набегании и сбегании с барабана 6 на блоки 1. Высота H верхнего блока 1 относительно подъёмного барабана 6 диаметром $\varnothing D$ должна быть такая, чтобы угол набегания каната на блок 1 не превышал 6° относительно осевой плоскости ручья блока.

Рассмотренный вариант новой конструктивной схемы [12-15] устройства точного наведения на упавшие вертикально кассеты, отличается применением поворотных блоков, обеспечивающих в полиспастной системе возможность перемещения захватного устройства с дополнительной нагрузочной массой строго по вертикальной оси, как при захвате кассеты, так и при её подъеме. Следует отметить, что рассмотренная конструктивная схема предложена к применению в новой погрузочной машине с гибким канатным подвесом автоматических грузозахватных устройств [12], однако при подъеме упавших кассет требуется применение в захватном устройстве дополнительной массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качур, С.А. Модель функционирования системы наведения перегрузочных машин АЭС на основе сетей Петри [Текст] / С.А. Качур, Н.В. Шахова, А.А. Халина // Энергетические установки и технологии. – 2017. – Т. 3. – № 2. – С. 35-40.
2. Авдеев, А.А. Машины перегрузки ядерного топлива нового поколения для энергоблоков проекта АЭС-2006 С ВВЭР-1200 [Текст] / А.А. Авдеев [и др.] // Интеграл. – 2010. № 1. – С. 28-33.
3. Патент РФ на изобретение № 2380206 Российская Федерация МПК: B23K1102, B23K1110, B23K3102, G21C310, G21C2100. Способ изготовления тепловыделяющего элемента ядерного реактора [Текст] / Чапаев И.Г., Струков А.В., Яичников С.В., Кислицкий А.А., Петров А.Н., Лузин А.М., Юрин П.М.; Заявитель и патентообладатель открытое акционерное общество «Новосибирский завод химконцентратов». – № 2007108867/02; заявл. 09.03.2007; опубл. 27.01.2010.
4. Margolin, B.Z. Radiation embrittlement of support structure materials for WWER RPVS / B.Z. Margolin [and others] // Journal of nuclear materials. Elsevier Science Publishing Company, Inc. 2018. VOL. 508. P. 123-138.
5. Яблоновский, И.М. Вероятностный анализ безопасности перегрузочной канатной машины для реакторов типа ВВЭР [Текст] / И.М. Яблоновский // Тяжелое машиностроение. – 2008. – № 3. – С. 5-8.
6. Лапкис, А.А. Особенности продления срока эксплуатации перегрузочных машин энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000 [Текст] / А.А. Лапкис, В.Н. Никифоров, О.Ю. Пугачева // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 1 (18). – С.95-103.
7. Жемчугов, Г.А. Новое поколение комплекса электрооборудования для перегрузочных машин АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000 [Текст] / Г.А. Жемчугов, А.Н. Казачков, Ю.Т. Портной, М.А. Смирнитский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2004. – Т. 101. – С. 200-218.

8. Лапкис, А.А. Виброакустическая паспортизация режимов работы машин перегрузочных энергоблоков ВВЭР [Текст] / А.А. Лапкис, В.Н. Никифоров, Л.А. Первушин // Глобальная ядерная безопасность. – 2018. – № 2 (27). – С.82-90.
9. Панасенко, Н.Н. Оптимизация амплитудно-частотных характеристик металлоконструкций подъемно-транспортных машин [Текст] / Н.Н. Панасенко, Р.К. Асадулин // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2005. – № 2 (25). – С.71-80.
10. Коробкин, В.В. Информационно-управляющая система машины перегрузочной нового поколения [Текст] / В.В. Коробкин, В.П. Поваров // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2017. – №3. – С. 98-107.
11. Кравченко, П.Д. Инновационные проектные решения в атомном машиностроении [Текст] / П.Д. Кравченко // Глобальная ядерная безопасность. – 2012. – № 4 (5). – С. 60-65.
12. Kravchenko, P.D., Fedorenko, D.N. Heuristic Method of Design of the Load Gripping and Manipulating Devices For Work In Special Conditions. International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 10, Number 6 (2015), pp. 14537-14542.
13. Кравченко, П.Д. Проблема совершенствования транспортно-технологического оборудования в атомном машиностроении на примере перегрузочной машины [Текст] / П.Д. Кравченко, А.Д. Маляренко // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 1 (18). – С. 87-94.
14. Kravchenko, P.D., Fedorenko, D.N. New Engineering Decisions in Nuclear Engineering. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences ISSN 1819-6608 VOL. 11, № 3, February. 2016. P. 1951-1955.
15. Патент РФ на изобретение № 2332729 Российская Федерация С1 МПК G 21 С 3/00 (2006.01). Подвесное автоматическое устройство поворота и захвата пробки пенала. [Текст] / П.Д. Кравченко, И.М. Яблоновский, В.С. Магальясов; Заявитель и патентообладатель Южно-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса. – № 2007111699/06; Заявл. 29.03.2007; Оpubл. 27.08.2008, Бюл. №24.

REFERENCES

- [1] Kachur S.A., Shahova N.V., Halina A.A. Model` funkcionirovaniya sistemy` navedeniya peregruzochny`x mashin AE`S na osnove setej Petri [Functioning Model of the Aiming System of Shifting Machines of APP on the Basis of the Petry Nets]. E`nergeticheskie ustanovki i tekhnologii [Power Plants and Technologies]. 2017. VOL. 3. №2. P. 35-40 (in Russian).
- [2] Avdeev A.A., Kobelev A.M., Silnikov D.V., Efremov S.M., Pinchuk M.E., Marchenko S.A., Korobkin V.V. Mashiny` peregruzki yadernogo topliva novogo pokoleniya dlya e`nergoblokov proekta AE`S-2006 S VVE`R-1200 [Machine Overload of Nuclear Fuel for a New Generation of Power Units of NPP-2006 Project with WWER-1200]. Integral] 2010. №1. P. 28-33 (in Russian).
- [3] Patent RF na izobretenie. № 2380206 Rossijskaya Federaciya MPK: B23K1102, B23K1110, B23K3102, G21C310, G21C2100 [Patent of the Russian Federation for Invention № 2380206 Russian Federation B23K1102, B23K1110, B23K3102, G21C310, G21C2100]. Spособ izgotovleniya teplovy`delyayushhego e`lementa yadernogo reaktora [Method for Manufacturing of Nuclear Reactor Fuel Element]. I.G. Chapaev, A.V. Strukov, S.V. Jaichnikov, A.A. Kislitskij, A.N. Petrov, A.M. Luzin, P.M. Jurin. Zayavitel` i patentoobladatel` otkry`toe akcionernoe obshhestvo «Novosibirskij zavod ximkoncentratov» [Applicant and Patentee of the Company «Novosibirsk Plant of Chemical Concentrates»]. № 2007108867/02. Appl. 09.03.2007. Publ. 27.01.2010 (in Russian).
- [4] Margolin B.Z., Yurchenko V., Kostylev V.I., Morozov A.M., Varovin A.Y., Rogozkin S.V., Nikitin A.A. Radiation embrittlement of support structure materials for WWER RPVS. Journal of nuclear materials. Elsevier Science Publishing Company. Inc. 2018. VOL. 508. P. 123-138 (in English).
- [5] Yablonovskiy. I.M. Veroyatnostny`j analiz bezopasnosti peregruzochnoj kanatnoj mashiny` dlya reaktorov tipa VVE`R [Probabilistic Analysis of Safety of Shifting Rope Machine for the WWER Reactors]. Tyazheloe mashinostroenie [Heavy Mechanical Engineering]. 2008. № 3. P. 5-8 (in Russian).
- [6] Lapkis A.A., Nikiforov V.N., Pugacheva O.Yu. Osobennosti prodleniya sroka e`kspluatatsii peregruzochny`x mashin e`nergoblokov s reaktorami VVE`R-1000 [Operation Extension Features of Overload Machines of WWER -1000 Reactors Power Units]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety]. 2016. № 1 (18). P. 95-103 (in Russian).
- [7] Zhemchugov G.A., Kazachkov A.N., Portnoy Y.T., Smirnitskii M.A. Novoe pokolenie kompleksa e`lektrooborudovaniya dlya peregruzochny`x mashin AE`S s reaktorami tipa VVE`R-1000 [New Generation of Complex Electrical Equipment for Reloading Machines of NPPs with WWER

- Reactors]. *Voprosy` e`lektromexaniki. Trudy` VNIIE`M* [Questions of Electromechanics. Proceedings VNIIE`M]. 2004. Vol. 101. P. 200-218 (in Russian).
- [8] Lapkis A.A., Nikiforov V.N., Pervushin L.A. Vibroakusticheskaya pasportizaciya rezhimov raboty` mashin peregruzochny`x e`nergoblokov VVE`R [Vibroacoustical Certification of Operating Modes of WWER Fuel-Handling Machines]. *Globalnaya yadernaya bezopasnost* [Global Nuclear Safety]. 2018. № 2 (27). P. 82-90 (in Russian).
- [9] Panasenko N.N., Asadulin R.K. Optimizaciya amplitudno-chastotny`x xarakteristik metallokonstrukcij pod`emno-transportny`x mashin [Optimization of Amplitude-Frequency Characteristics of Metal Structures of Hoisting-and-Transport Machines]. *Vestnik Astraxanskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta* [Bulletin of Astrakhan State Technical University]. 2005. №2 (25). P. 71-80. (in Russian).
- [10] Korobkin V.V., Povarov V.P. Informacionno-upravlyayushhaya sistema mashiny` peregruzochnoj novogo pokoleniya [A New-Generation Information Controlling System for the Refueling Machine]. *Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Yadernaya e`nergetika* [News of Higher Educational Institutions. Nuclear Power]. 2017. №3. P. 98-107 (in Russian).
- [11] Kravchenko P.D. Innovacionny`e proektny`e resheniya v atomnom mashinostroenii [Innovative Design Solutions in Nuclear Engineering]. *Globalnaya yadernaya bezopasnost* [Global nuclear safety]. 2012. № 4 (5). P. 60-65 (in Russian).
- [12] Kravchenko P.D., Fedorenko D.N. Heuristic Method of Design of the Load Gripping and Manipulating Devices For Work In Special Conditions. *International Journal of Applied Engineering Research* ISSN 0973-4562 Volume 10, Number 6. 2015. P. 14537-14542 (in English).
- [13] Kravchenko P.D., Malyarenko, A.D. Problema sovershenstvovaniya transportno-texnologicheskogo oborudovaniya v atomnom mashinostroenii na primere peregruzochnoj mashiny` [The Challenge of Improving Transport and Technological Equipment in Nuclear Power Engineering; Handling Machine]. *Globalnaya yadernaya bezopasnost* [Global Nuclear Safety]. 2016. № 1 (18). P. 87-94 (in Russian).
- [14] Kravchenko P.D., Fedorenko D.N. New Engineering Decisions in Nuclear Engineering. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences* ISSN 1819-6608 VOL. 11, № 3, February. 2016. P. 1951-1955 (in English).
- [15] Patent RF na izobretenie № 2332729 Rossijskaya Federaciya S1 MPK G 21 C 3/00 (2006.01). Podvesnoe avtomaticheskoe ustrojstvo povorota i zaxvata probki penala [Patent of the Russian Federation for Invention № 2332729 Russian Federation C1, IPC G 21 C 3/00 (2006.01). Suspended Automatic Device for Turning and Capturing the Plug of Case]. P.D. Kravchenko, I.M. Yablonovskiy, M.S. Mahalasa. Zayavitel` i patentoobladatel` Yuzhno-Ros. gos. un-t e`konomiki i servisa [Applicant and Patentee of the South Russian State University of Economics and Service]. №2007111699/06; Appl. 29.03.2007; Publ. 27.08.2008. Byul. № 24 (in Russian).

Design Version of the Device, Exact Positioning of the Gripper for Lifting the Fallen Cassettes in the WWER Reactor

P.D. Kravchenko ^{*1}, D.N. Fedorenko ^{**2}, Y.P. Kosogova ^{*3}

^{*}*Volgodonsk Engineering Technical Institute, the Branch of the National Research Nuclear University "MEPhI", Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

¹ORCID iD: 0000-0003-3437-9998

WoS Researcher ID: G-5279-2017

e-mail: krapa21@yandex.ru

³ORCID iD: 0000-0003-3952-7814

WoS Researcher ID: Y-4338-2018

e-mail: kosogova-up@yandex.ru

^{**}*Atomspetsservis Ltd, Vosmaya Zavodskaya St., 23, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347469*

²ORCID iD: 0000-0003-2483-7801

WoS Researcher ID: G-5164-2017

e-mail: fdn999@ya.ru

Abstract – The paper presents the variant of the scheme of precise positioning of the suspension device for pointing at the fallen WWER reactor cassette. The scheme is offered instead of the applied load-lifting device with long telescopic links.

Keywords: precise positioning, lifting device, rope suspension, double polyspast.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.039

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНТРОПИЙНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ
ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ
ОБОРУДОВАНИЯ АЭС**

© 2019 О.Е. Драка*, Е.А. Абидова*, А.В. Чернов*, О.И. Бейсуг*, А.В. Благин**

**Волгодонский инженерно-технический институт – филиал научного исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия*

***Донской государственный технический университет (ДГТУ), Ростов-на-Дону, Россия*

Целью исследования являлось изучение возможности применения энтропии Реньи для контроля состояния оборудования АЭС и возможности выявления неисправностей этого оборудования. В настоящей работе была произведена обработка видеоизображений, полученных с помощью системы тепловизионного контроля на РоАЭС. Для этого была разработана программа для расчета энтропии Реньи 0-го, 1-го и 2-го порядков для видеоизображений, а так же был произведен анализ временных изменений энтропии Реньи 0-порядка, 1-порядка, 2-порядка для выявления неисправностей оборудования АЭС. Расчет энтропийных показателей позволяет получить важную качественную и количественную информацию о структуре сложных физических систем, особенностях их динамической эволюции и о физических процессах, происходящих в таких системах.

Ключевые слова: тепловизионный контроль, цифровая регистрация изображений, энтропия Реньи, атомная электрическая станция (АЭС).

Поступила в редакцию 04.09.2018

После доработки 21.12.2018

Принята к публикации 28.12.2018

ВВЕДЕНИЕ

Видеоизображения, наряду с другими временными рядами, являются важнейшим источником информации во многих естественных науках, в том числе в физике, астрофизике и геофизике. Чтобы количественно охарактеризовать структурные и статистические особенности изображений различных форматов, различных фрагментов одного изображения или разные кадры одного временного ряда изображений необходимо иметь удобные легко вычисляемые количественные параметры, отражающие эти особенности. Энтропия Реньи [1], вычисляемая на двумерном покрытии, хорошо подходит для таких целей. Она позволяет количественно оценить изменения в структурах и статистике, определить направление и темп эволюции наблюдаемой системы, может служить количественным критерием при разработке моделей физических процессов, видимым представлением которых является двумерное изображение.

Необходимость обработки изображений возникает при решении многих задач технической диагностики. К таким задачам можно отнести тепловизионный контроль зон нагрева поверхностей объектов диагностики [2]. Актуальность такого контроля еще обусловлена тем, что во многих структурах атомной энергетики наблюдается тенденция перехода от плановых ремонтов оборудования к ремонтам по фактическому

состоянию оборудования. В процессе эксплуатации оборудование под влиянием некоторых факторов, таких, как механические, вибрационные, электрические воздействия, износные явления, увлажнение, старение материалов, конструктивные и технологические просчеты и др., может существенно снизить свою надежность. В последнее время делаются попытки расширить область применения средств инфракрасной техники при решении традиционных задач профилактических испытаний [3].

Тепловизионный контроль позволяет выявлять зоны повреждения, распределение и значение температуры в зоне дефекта, глубину его залегания. Применение тепловизионной диагностики основано на том, что наличие некоторых видов дефектов оборудования вызывает изменение температуры дефектных элементов и, как следствие, изменение интенсивности инфракрасного излучения, которое может быть зарегистрировано тепловизионными приборами.

ЭНТРОПИЙНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ

Целью исследования является изучение возможности применения энтропии Реньи для контроля состояния оборудования АЭС и возможности выявления неисправностей этого оборудования.

Для расчета энтропии Реньи был использован язык программирования MATLAB. MATLAB является высокоуровневым интерпретируемым языком программирования, включающим основанные на матрицах структуры данных, широкий спектр функций, интегрированную среду разработки, объектно-ориентированные возможности и интерфейсы к программам, написанным на других языках программирования.

С внедрением в технику наблюдений цифровой регистрации изображений все необходимые трансформации первичных сигналов осуществляются, как правило, аппаратно или программно в реальном времени, и на выходе имеются блоки данных в определенном формате, содержащие числовые массивы в той или иной физической размерности, а также всю сопроводительную документацию (метаданные). В метаданных указываются: назначение и характер данных, дата и время регистрации, тип и характеристики регистрирующего прибора, точность измерений, условия получения данных, информация о фотометрической и масштабной калибровках, и ряд других параметров.

Обобщенная энтропия Реньи порядка q определяется [4] по формуле:

$$R_q(a) = \frac{1}{1-q} \ln \left(\sum_{i=1}^{N(a)} p_i^q \right), \quad (1)$$

где q – порядок энтропии, $q \in (-\infty, \infty)$;

a – множество точек;

$N(a)$ – общее число точек, покрывающих объект;

p – вероятность;

i -тый гиперкуб данного покрытия.

Энтропию Реньи нулевого порядка ($q=0$) называют, обычно, структурной энтропией, так как эта энтропия несет информацию о том, как плотно исследуемый объект заполняет собой пространство вложения. В данном случае это логарифм числа пикселей, т.е. площадь, занятая областью при выбранном уровне дискриминации (отсечки) по полю, в данном случае выбирается диапазон температуры.

Энтропия Реньи нулевого порядка определяется по формуле [4]:

$$R_0(a) = \ln N(a). \quad (2)$$

Принцип расчета энтропии Реньи 0-порядка состоит в разбиении изображения на ячейки, подсчете ячеек, заполненных изображением (если хоть один пиксель изображения попал в ячейку, она считается заполненной) и умножения числа заполненных ячеек на их площадь.

Энтропия Реньи первого порядка ($q=1$) определяется:

$$R_1 = \lim_{q \rightarrow 1} \frac{\sum_{i=1}^{N(a)} p_i^q \ln p_i}{-\sum_{i=1}^{N(a)} p_i^q} = -\sum_{i=1}^{N(a)} p_i \ln p_i \quad (2)$$

Исторически энтропию первого порядка называют информационной, так как она рассчитывается по формуле, похожей на формулу информационной энтропии Шеннона [4]. Ее величина дает количественную меру степени хаотичности распределения «массы» рассматриваемого объекта и позволяет проследить динамику переходов хаос–порядок и порядок–хаос.

Энтропия Реньи второго порядка:

$$R_2(a) = \ln(\sum_{i=1}^{\varepsilon} p_i^2) \quad (3)$$

Энтропию второго порядка называют корреляционной, так как она дает меру для оценки пространственной корреляции элементов структуры исследуемого объекта. Уменьшение этой энтропии говорит о росте корреляций, а ее увеличение соответствует уменьшению коррелированности элементов и росту хаотичности в системе.

РАСЧЕТ ЭНТРОПИИ РЕНЬИ

В настоящей работе была произведена обработка видеоизображений, полученных с помощью системы тепловизионного контроля на РоАЭС. Для этого была разработана программа для расчета энтропии Реньи 0-го, 1-го и 2-го порядков для видеоизображений, а так же был произведен анализ временных изменений энтропии Реньи 0-порядка, 1-порядка, 2-порядка для выявления неисправностей оборудования АЭС.

Полученные данные с РоАЭС взяты с временным промежутком в 2 минуты.

На рисунке 1 представлены данные, снятые с помощью системы тепловизионного контроля на РоАЭС. Камера FLIRT250 Westem. Объектив FOL18. Параметры объекта: коэффициент излучения 0,83; отраженная температура 20⁰С, температура воздуха 30⁰С, относительная влажность 50%, расстояние 5,3 м. Минимальная температура 24,4⁰С, максимальная температура 53,2⁰С.

На рисунке 2 представлены данные снятые через две минуты. Время 12:43. Минимальная температура 32,6⁰С, максимальная температура 58,8⁰С.

Данные с рисунков 1 и 2 были переведены в Excel файл, в котором были представлены температуры в каждой точке.

Для изображений, представленных на рисунках 1 и 2 были получены графики, на которых видны участки с диапазонами температур от 51⁰С до 53⁰С (рис. 2).

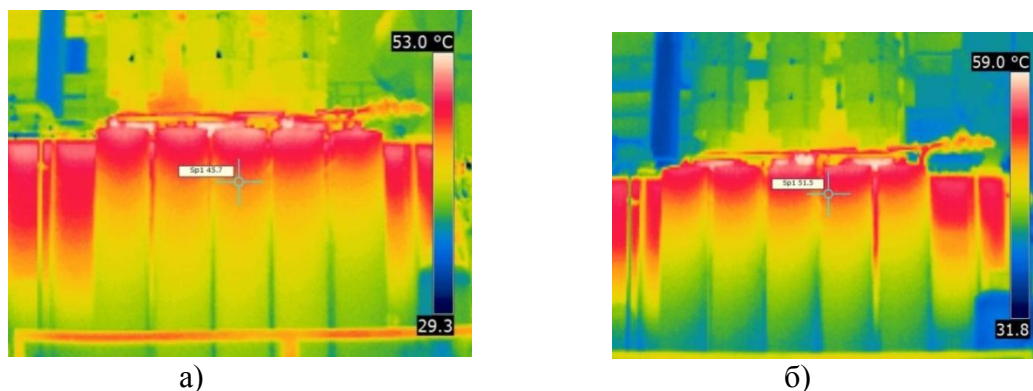


Рисунок 1 – Данные тепловизионного контроля: а) от 02.08.2016, 12:41; б) от 02.08.2016, 12:43 [Thermal imaging control data: a) 08/02/2016, 12:41; b) 08/02/2016, 12:43]

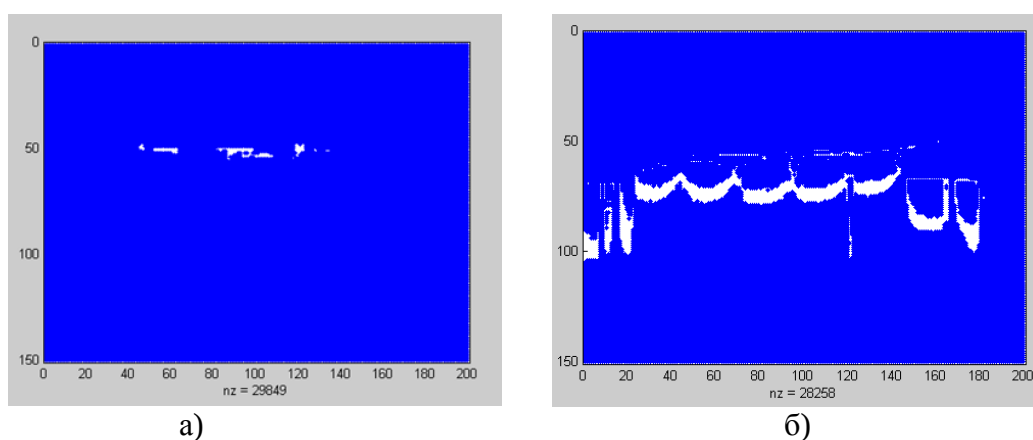


Рисунок 2 – Области с диапазоном температур от 51°C до 53°C: а) время 12:41; б) время 12:43 [Temperature range from 51°C to 53°C: a) time 12:41; b) time 12:43]

При диагностике оборудования подлежащие обработке изображения формируются под влиянием нестационарных, хаотичных процессов, что придает им свойства фрактальных объектов (рис. 2), таких как дробная размерность [5] и положительный показатель Ляпунова [6]. Для анализа фрактальных объектов обосновано применение методов энтропийной параметризации.

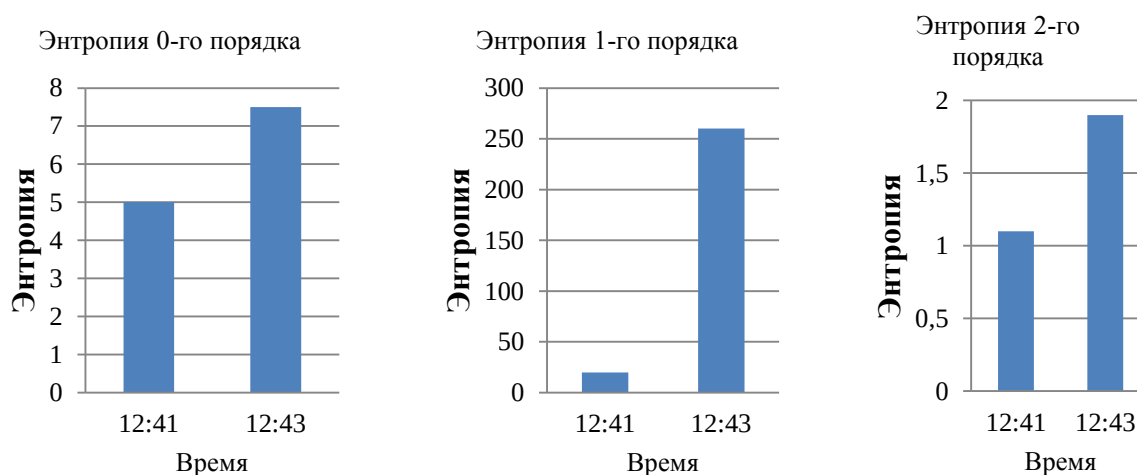


Рисунок 3 – Временные вариации энтропии Реньи порядка $q=0$, $q=1$ и $q=2$ [Temporary variations of the Renyi entropy of order $q = 0$, $q = 1$ and $q = 2$]

Как видно из рисунка 2, через 2 минуты произошло существенное увеличение площадей, имеющих температуру, близкую к максимальной. Была написана программа, которая производила определение границ областей температур (рис. 2) и по формулам (1)-(3) рассчитывала энтропию Реньи 0-го, 1-го и 2-го порядка (рис. 3). Для определения границ температурных областей (рис. 2) была написана программа, алгоритм которой представлен на рисунке 4.

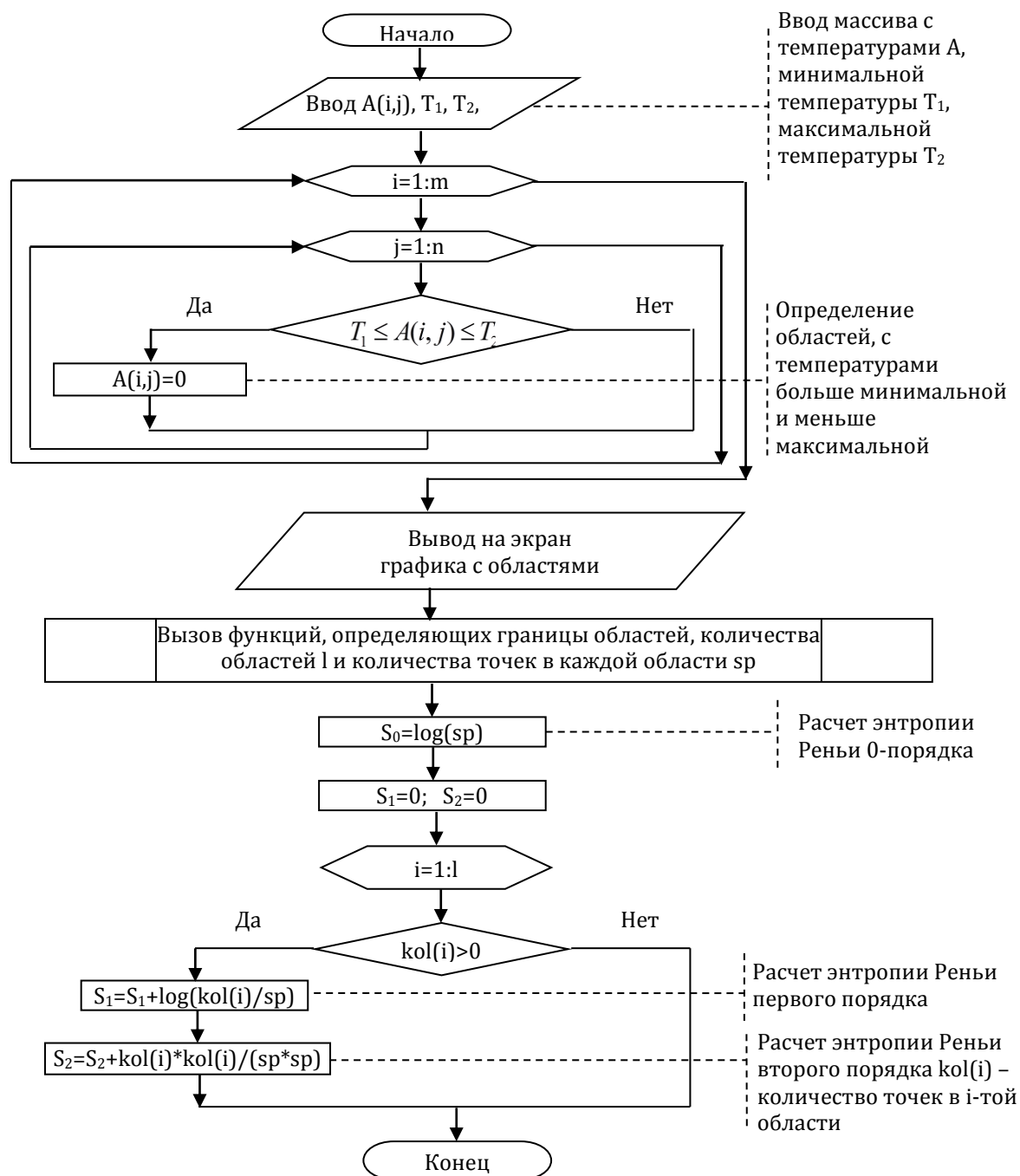


Рисунок 4 – Блок-схема программы, определяющей границы температурных областей на двумерном изображении [A flowchart of the program defining the boundaries of the temperature regions on a two-dimensional image]

В результате сравнительного анализа, мы можем подвести итог, что энтропия Реньи 0-го, 1-го и 2-го порядка возросла после промежутка времени равного 2

минутам (рис. 3).

Повышение энтропии 0-го порядка говорит о том, что возрастают площади с температурами, близкими к максимальной температуре исследуемого объекта (рис. 2). Определение энтропии Реньи 0-го порядка играет важную роль в решении задач технической диагностики, где необходима точность определения площадей отдельных областей, имеющих сложную форму.

Повышение энтропии 1-го порядка дает увеличение количественной меры степени хаотичности распределения «массы» рассматриваемого объекта (рис. 2-3).

Увеличение энтропии 2-го порядка соответствует уменьшению коррелированности элементов и росту хаотичности в системе (рис. 2-3).

Расчет энтропийных показателей позволяет получить важную качественную и количественную информацию о структуре сложных физических систем, особенностях их динамической эволюции [7, 8] и о физических процессах, происходящих в таких системах [9, 10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климонтович, Ю.Л. Введение в физику открытых систем [Текст] / Ю.Л. Климонтович. – Москва : Янус-К, 2002. – 284 с.
2. Tarynin I.V., Madarov A.V. // *Izv. Volgograd. Gos. Tekhn. Univ.* 2014. V.6. №18 (145). P. 98-102. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22621685>.
3. Вавилов, В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль [Текст] / В.П. Вавилов. – Москва : ИД Спектр, 2009. – 544 с.
4. Чумак, О.В. Энтропия и фракталы в анализе данных [Текст] / О.В. Чумак. – Москва – Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2011. – 164 с.
5. Мандельброт, Б.Б. Самоаффинные фрактальные множества [Текст] / Б.Б. Мандельброт – «Фракталы в физике». Москва : Мир, 1988. – 672 с.
6. Ikhlaizov S.Z. // *Jmsk. Nauch. Vestn.* 2012. №2 (110). P. 235-239 <https://elibrary.ru/item.asp?id=17879234>.
7. Абидова, Е.А. Диагностирование электроприводной аппаратуры с использованием энтропийных показателей [Текст] / Е.А. Абидова [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – №4. – С. 69-77.
8. Абидова, Е.А. Обработка изображений в системе диагностики дизель-генераторов АЭС с использованием энтропийных подходов [Текст] / Е.А. Абидова [и др.] // Ядерная физика и инжиниринг. – 2017. – № 2. – С. 1-6.
9. Абидова, Е.А. Диагностирование дизель-генераторного оборудования АЭС с использованием детерминированных и стохастических методов [Текст] / Е.А. Абидова [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 3 (20). – С. 74-79.
10. Абидова, Е.А. Диагностирование электроприводной аппаратуры с использованием энтропийных показателей [Текст] / Е.А. Абидова, Л.С. Хегай, А.В. Чернов, О.Ю. Пугачева // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 4 (21). – С. 69-77.

REFERENCES

- [1] Klimontovich Yu.L. Vvedenie v fiziku otkryty`x sistem [Introduction to the Physics of Open Systems] Moscow. Janus-K. 2002. 284 p. (in Russian).
- [2] Tarynin I.V., Madarov A.V. *Izv. Volgograd. Gos. Tekhn. Univ.* 2014. V.6. No. 18 (145). P. 98-102 <https://elibrary.ru/item.asp?id=22621685> (in Russian).
- [3] Vavilov V.P. *Infrakrasnaya termografiya i teplovoj kontrol`* [Infrared Thermography and Thermal Control]. Moscow. Id Spectrum, 2009. 544 p. (in Russian).
- [4] Chumak, O.V. *E`ntropiya i fraktaly` v analize danny`x* [Entropy and Fractals in Data Analysis]. Moscow – Izhevsk. [SRC "Regular and Chaotic Dynamics" Institute for Computer Research]. 2011. 164 p. (in Russian).
- [5] Mandelbrot B.B. *Samoaffinny`e fraktal`ny`e mnozhestva* [Self-Affine Fractal Sets]. *Fraktaly` v fizike* [Fractals in Physics]. Moscow. Mir, 1988. 672 p. (in Russian).
- [6] Ikhlaizov S.Z. *Jmsk. Nauch. Vestn.* 2012. N. 2 (110). P. 235-239

- <https://elibrary.ru/item.asp?id=17879234> (in Russian).
- [7] Abidova E.A., Hegay L.S., Chernov A.V., Draka O.E., Pugacheva O.Yu. Diagnostirovanie e`lektroprivodnoj apparatury` s ispol`zovaniem e`ntropijny`x pokazatelej [Diagnosis of Electric Drive Equipment Using Entropy Indicators]. *Global'naya yadernaya bezopasnost`* [Global Nuclear Security]. 2016. N. 4. FROM. 69-77 (in Russian).
 - [8] Abidova E.A., Soloviev V.I., Draka O.E., Hegay L.S., Chernov A.V., Pugacheva O.Yu. Obrabotka izobrazhenij v sisteme diagnostiki dizel`-generatorov AE`S s ispol`zovaniem e`ntropijny`x podxodov [Image Processing in the System of Diagnostics of Diesel Generators of Nuclear Power Plants Using Entropy Approaches] *Yadernaya fizika i inzhiniring* [Nuclear Physics and Engineering]. 2017. N. 2. P. 1-6 (in Russian).
 - [9] Abidova E.A., Hegay L.S., Chernov A.V., Bulava V.A., Soloviev V.I., Pugacheva O.Yu. Diagnostirovanie dizel`-generatornogo oborudovaniya AE`S s ispol`zovaniem determinirovanny`x i stoxasticheskix metodov [Diagnosis of Diesel-Generator Equipment of Nuclear Power Plants Using Deterministic and Stochastic Methods] *Global'naya yadernaya bezopasnost`* [Global Nuclear Security]. 2016. N. 3 (20). P. 74-79 (in Russian).
 - [10] Abidova, E.A., Hegay L.S., Chernov A.V., Pugacheva O.Yu. Diagnostirovanie e`lektroprivodnoj armatury` s ispol`zovaniem e`ntropijny`x pokazatelej [Diagnosis of Electric Drive Armature Using Entropy Indicators]. *Global'naya yadernaya bezopasnost`* [Global Nuclear Security]. 2016. N. 4 (21). P. 69-77 (in Russian).

Using Entropy Methods of Processing Video Images to Control NPP Equipment

O.E. Draka*¹, E.A. Abidova*², A.V. Chernov*³, O.I. Beysug*⁴, A.V. Blagin⁵**

**Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI", Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

¹ORCID iD: 0000-0002-3397-6830

Wos Researcher ID: O-2222-2018

e-mail: oed17@mail.ru

²ORCID iD: 0000-0003-0258-5543

Wos Researcher ID: O-1870-2018

e-mail: e-abidova@mail.ru

³ORCID iD: 0000-0003-2700-0898

Wos Researcher ID: G-3742-2017

e-mail: chernov.alexander47@mail.ru

⁴ORCID iD: 0000-0001-9218-9354

Wos Researcher ID: O-6513-2018

e-mail: beisug@rambler.ru

***Don State Technical University, Gagarin square, 1, Rostov-on-Don, Russia 344000*

⁵ORCID iD: 0000-0002-1349-8528

Wos Researcher ID: B-3843-2016

e-mail: a-blagin@mail.ru

Abstract – The purpose of the study is to study the possibility of Renyi entropy applying to monitor the condition of nuclear power plant equipment and the ability to detect faults in this equipment. In the present work processing of video images obtained with the help of a thermal imaging control system at Rostov NPP is performed. For this purpose a program is developed for the Renyi entropy calculating of the 0th, 1st, and 2nd orders for video images, as well as an analysis of the time variations of the 0-order, 1-order, 2-order Renyi entropy for detecting malfunctions in nuclear power plant equipment. Calculation of entropy indicators allows to obtain important qualitative and quantitative information about the structure of complex physical systems, the features of their dynamic evolution and about the physical processes taking place in such systems.

Keywords: thermal imaging control, digital image recording, Renyi entropy, nuclear power plant.

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.311.25:621.039.5

**ОЦЕНКА РАЗВИТИЯ ЭРРОЗИОННО-КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА
С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОЙ
АНИЗОТРОПИИ**

© 2019 А.К. Адаменков, И.Н. Веселова, В.Я. Шпицер

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал научного исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

В работе представлена оценка развития эррозионно-коррозионного износа элементов трубопроводов с помощью метода измерения магнитной анизотропии. Целью обследования являлось фиксирование локально-напряженных областей, которые присущи локальным утонениям стенки в зонах с вероятным эррозионно-коррозионным износом и определение параметров магнитной анизотропии, а также формирование базы данных результатов измерений.

Ключевые слова: трубопроводы, толщинометрия, эрозионно-коррозионный износ, магнитная анизотропия.

Поступила в редакцию 18.10.2018

После доработки 21.02.2019

Принята к публикации 01.03.2019

Эрозионно-коррозионный износ (ЭКИ) является одним из распространенных механизмов повреждений элементов трубопроводов, изготовленных из углеродистых сталей, на электрических станциях. Анализ аварий по причине ЭКИ на американской АЭС Сарри-2 и на японской АЭС Михама-3 показывает, что результатом бесконтрольного развития ЭКИ, является рост сквозной трещины, ориентированной вдоль направления движения рабочей среды.

В соответствии с требованиями [1], на АЭС концерна Росэнергоатом разработаны перечни элементов и деталей трубопроводов турбинного отделения (ТО), подверженных эрозионно-коррозионному износу. Документ определяет необходимость периодического контроля толщины стенки таких узлов трубопроводов. Выполнение эксплуатационного контроля толщин стенок трубопроводных систем, в части обеспечения положений руководящего документа, обеспечивает надежность элементов трубопроводов по критериям сопротивления разрушению металла А именно, предотвращение [2]:

- 1) образования течей через устойчивые сквозные дефекты ЭКИ;
- 2) гильотинного обрыва трубопровода с двусторонним истечением из него;
- 3) разрыва трубопровода вдоль его оси по образующей.

В период эксплуатации требуемый уровень надежности обеспечивается до следующего срока выполнения толщинометрии (или окончания эксплуатации). С другой стороны, локальный износ (локальное утонение) образует локальные повышенные напряженные зоны, которые при утонении стенки значительно возрастают. Учитывая, что трубопроводы периодически работают в режиме рабочего и атмосферного давления, металл трубопроводов испытывает знакопеременные нагрузки, которые в локальных областях в процессе эксплуатации могут приводить к

усталостным малоцикловым повреждениям.[3]

Механизм действия ЭКИ – формирование локальных зон утонения, ориентированных в направлении движения потока (1 критерий развития ЭКИ). При проведении технического обследования технологического трубопровода на одном из энергоблоков электростанции [4] были обнаружены зоны утонения. Для оценки их влияния на техническое состояние трубопроводов были выполнены проверочные расчеты.

По результатам расчетов определено, что в зоне утонения стенки трубопровода общие мембранные напряжения превышают допустимые значения, но не превышают временное сопротивление. Как следствие, это может привести к необратимым локальным пластическим деформациям на участках с утонением в зонах действия местных мембранных напряжений.

С целью выполнения оценки остаточных напряжений в металле трубопроводов, подверженных ЭКИ, фиксирования возможных локальных напряженных зон в период проведения ППР энергоблока Ростовской АЭС проведено обследование методом магнитной анизотропии [5] ряда участков, согласно перечня элементов и деталей трубопроводов ТО энергоблока Ростовской АЭС (табл. 1). Целью обследования являлось фиксирование локально-напряженных областей, которые присущи локальным утонениям стенки в зонах с вероятным ЭКИ. Определение параметров магнитной анизотропии, формирование базы данных результатов измерений[6].

Во время выполнения работ на поверхность контролируемой зоны участков трубопроводов ТО наносилась прямоугольная координатная сетка. Размерность зоны и шаг координатной сетки определяются размером контролируемой зоны.

Таблица 1 – Общие данные обследованных зон методом магнитной анизотропии [General data surveyed areas by the magnetic anisotropy]

№ зоны	Типо-размер	Параметры среды	Примечание
1	159х9	Среда – питательная вода (р=0,88 МПа, T=142 °C)	Трубопровод напора вспомогательного питательного насоса
2	159х9	Среда – питательная вода (р=0,88 МПа, T=159 °C)	Трубопровод рециркуляции турбопитательного насоса на деаэрактор
3	159х9	Среда – питательная вода (р=0,88 МПа, T=142 °C)	
...	...	...	
9	133х6	Среда – конденсат (р=2,65 МПа, T=288 °C)	Трубопровод сепаратора пароперегревателя на различных участках
10	133х6	Среда – конденсат (р=2,65 МПа, T=288 °C)	
11	133х13	Среда – конденсат (р=5,72 МПа, T=272 °C)	
...	...	...	...
21	159х7	Среда – конденсат (р=1,6 МПа, T= 188°C)	Трубопровод дополнительного слива сепарата в общий сепаратосборник

В результате выполненного обследования участков трубопроводов ТО энергоблока РоАЭС получены картограммы распределения разности главных напряжений (РГМН (а)) и концентраторов механических напряжений (КМН (б)) для каждой зоны. Графически полученные данные представлены в виде карт (рис. 1), на которых зоны концентрации напряжений показаны светлым (1), а зоны изменения величины РГМН и КМН – изострессами (2). Карты позволяют выделить локальные зоны увеличенных значений РГМН – локально напряженные зоны (1).

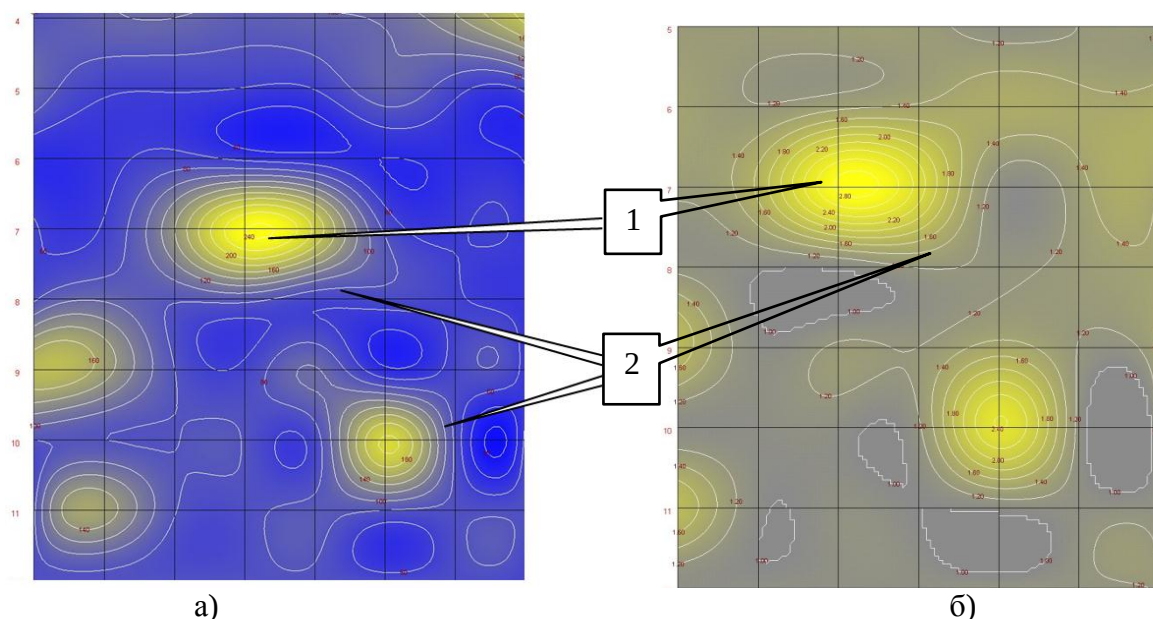


Рисунок 1 – Карта РГМН (а) и КМН (б) зоны №2 (табл.1): 1 – выявленные локальные области увеличенных значений РГМН и КМН; 2 – изострессы [The chart of the distribution of the difference between the main stresses (a) and mechanical stress concentrators (b) of zone No. 2 (Table 1): 1 – identified local areas of increased values; 2 – isostress]

Для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) каждого участка проводилась статистическая обработка значений РГМН и КМН и визуальный анализ полученных картограмм.

При выполнении анализа значений РГМН и КМН оценивались статистические параметры по каждой из зон, такие как средние, максимальные и минимальные значения РГМН (табл. 2) и КМН, а также значение среднеквадратичного отклонения [7].

Таблица 2 – Статистические данные РГМН [Statistics of main voltage difference distribution]

№№ зоны	Слой 0-6 мм				Слой 0-3 мм			
	Макс. РГМН	Мин. РГМН	Сред. РГМН	СКО	Макс. РГМН	Мин. РГМН	Сред. РГМН	СКО
Зона 1	91,1	-60,8	20,2	25	166,6	-116,9	31,8	47,8
Зона 2	121,8	-2,5	35,5	17,5	124,8	16,5	53	18,7
Зона 3	201,1	-51,6	26,7	41,3	229,9	-125,4	22	65,9
Зона 4	88,7	-37	12,5	27	165,7	-95,8	11,1	50,8
Зона 5	92,8	-64,9	12,6	31,8	146,9	-98,3	14,5	51,3
Зона 6	95,9	-51,5	15,4	32,6	142,3	-110	17,3	54,7
Зона 8	247,9	-224,5	3,3	50,2	283,6	-276,9	-10,5	65,7
Зона 9	179,2	-1,6	29,8	24,7	192,9	-21,1	50,5	31,9
Зона 10	139	-77,2	1,1	40,7	151,2	-145,7	-16,5	69,6
Зона 11	271,9	-56,9	19,5	44,5	298,4	-93,7	18,9	55,5
Зона 13	110,3	-80,2	15,6	46,8	180,2	-140,5	14,1	81,4
Зона 17	116,5	-64,8	17,8	36,8	214,1	-140,9	26,1	73,1
Зона 18	55,8	-66,1	14,9	20	103,1	-123,8	27,1	35,9
на 19	48	-61,6	8,9	20,2	82,5	-121,1	16,6	38,8
Зона 20	93,2	-45	32,3	33,9	169,2	-134,7	34,9	66,8
Зона 21	118,7	-116,8	20,1	38,3	185,2	-132,9	29,3	65,6

Дальнейшая обработка статистических данных проводилась в пакете Statistica с использованием инструмента «Кластерный анализ».

На первом этапе выполнена иерархическая классификация, при этом в качестве объектов приняты наблюдения (строки). В качестве правила объединения определен

метод полной связи, в качестве меры близости – евклидово расстояние.

Мера близости, определяемая евклидовым расстоянием, является геометрическим расстоянием в n-мерном пространстве [8]. Результатом, получаемым в результате древовидной кластеризации, является иерархическое дерево (рис. 2). Предварительный анализ указывает на объединение зон с номерами 2, 3, 9 и 11.

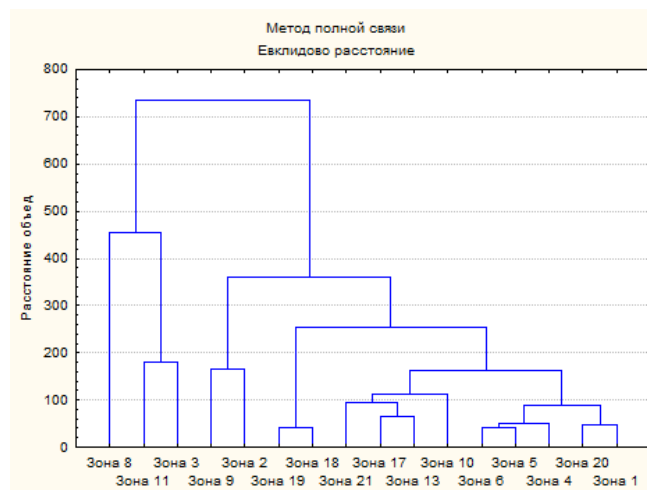


Рисунок 2 – Дендограмма зон наблюдения [Dendogram observation areas]

Для проверки данного предположения выполнялась разбивка исходных данных методом «К-средних» на 4 кластера. Метод заключается в следующем: вычисления начинаются с k случайно выбранных наблюдений (в нашем случае $k=4$), которые становятся центрами групп, после чего объектный состав кластеров меняется с целью минимизации изменчивости внутри кластеров и максимизации изменчивости между кластерами. Каждое следующее наблюдение ($K+1$) относится к той группе, мера сходства с центром тяжести которого минимальна.

После изменения состава кластера вычисляется новый центр тяжести, чаще всего, как вектор средних по каждому параметру. Алгоритм продолжается до тех пор, пока состав кластеров не перестанет меняться. В результате вычислений получены следующие три кластера (зона № 8 не отнесена ни к одному кластеру) (рис. 3):

Элементы кластера номер 2 (Статистика средних и расстояния до центра кластера. Кластер содержит 2 набл.										
	Зона 2	Зона 9								
Расст.	24,04729	24,04729								
Элементы кластера номер 3 (Статистика средних и расстояния до центра кластера. Кластер содержит 2 набл.										
	Зона 3	Зона 11								
Расст.	25,83701	25,83701								
Элементы кластера номер 4 (Статистика среднее и расстояния до центра кластера. Кластер содержит 11 набл.										
	Зона 1	Зона 4	Зона 5	Зона 6	Зона 10	Зона 13	Зона 17	Зона 18	Зона 19	
Расст.	10,24996	20,92571	13,47779	10,57309	28,01551	21,69330	29,49000	34,95184	44,40300	

Рисунок 3 – Кластеры, полученные в результате вычислений [Calculated clusters]

Таким образом, результаты кластерного анализа указывают на наличие четырех зон, объединенных в кластеры – № 2, 9, 3, 11.

Визуальный анализ полученных картограмм с целью фиксирования локально-напряженных зон и оценки их на соответствие критерию №1 формирования ЭКИ (протяженность вдоль направления движения среды) также показывает, что все четыре вышеуказанные зоны имеют ярко выраженный протяженный характер распределения напряжений (по направлению движения среды). Данное утверждение иллюстрируется сравнением картограмм зон 2 и 3 кластера (рис. 4) и картограммы 4 зоны, отнесенной к 4 кластеру (рис. 5)

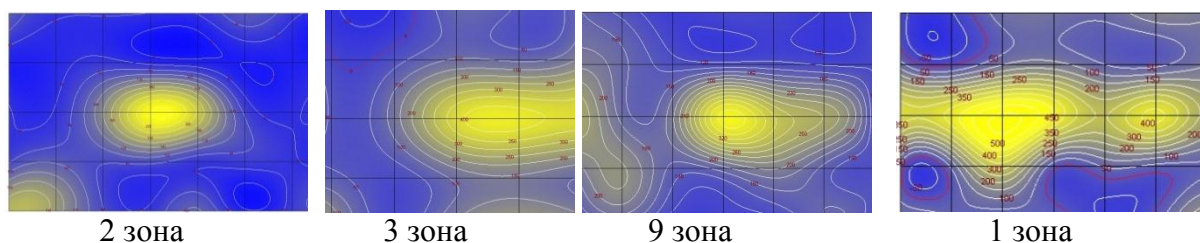


Рисунок 4 – Фрагменты карт РГМН с локально направленными областями действия напряжений [Fragment of chart of main voltage difference distribution with locally undirected stress areas]

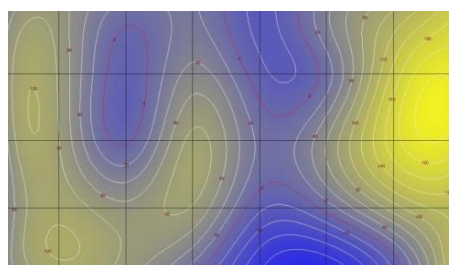


Рисунок 5 – Фрагмент карты РГМН 4 зоны с локально ненаправленными областями действия напряжений [Fragment of chart of main voltage difference distribution of 4th zone with locally undirected stress areas]

Для более полной визуализации ниже приведены 3D картограммы зоны №1 без областей с действующими мембранными напряжениями и зоны №3 с такой областью (рис. 6).

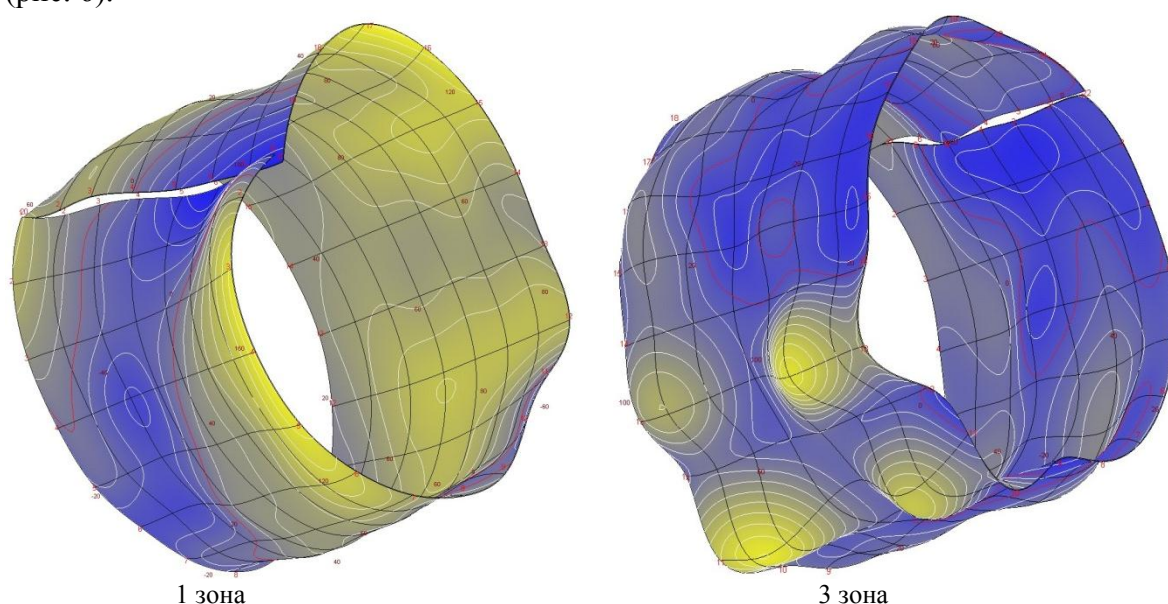


Рисунок 6 – 3D картограммы различных зон [3D cartograms of various zones]

Выводы

1. Показано, что диагностирование участков трубопроводов, подверженным ЭКИ, методом магнитной анизотропии является дополнительной контрольной операцией, повышающей достоверность оценки эксплуатационной надежности трубопроводов АЭС [9].

2. Проведенное обследование позволило зафиксировать локальные повышенные напряженные зоны на ряде участках трубопроводов ТО, которые образуются при утонении стенки, вызванном вероятным ЭКИ.

3. Сформированная база данных значений параметров НДС позволит в дальнейшем разработать численные критерии повреждаемости трубопроводов по механизму ЭКИ.

4. Дальнейшие исследования данных и аналогичных участков трубопроводов ТО энергоблоков АЭС обеспечит уточнение критериев [10] повреждаемости и, как следствие, достоверность подтверждения эксплуатационной надежности трубопроводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД ЭО 1.1.2.11.0571-2015 «Нормы допускаемых толщин стенок элементов трубопроводов из углеродистых сталей при эрозионно-коррозионном износе». – Москва : ВНИИАЭС, 2015. – 210 с.
2. ПНАЭ Г-7-002-86 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (с изменениями от 10.07.87). – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200037730> (дата обращения: 12.10.2018)
3. ПНАЭ Г-10-012-89 Нормы расчета на прочность стальных защитных оболочек атомных станций. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200059848> (дата обращения: 12.10.2018)
4. Расчет технологического трубопровода. Интернет-ресурс – URL: <https://proektanti.ru/user/work/34973> (дата обращения: 12.10.2018).
5. Сканер механических напряжений «STRESSVISION». Expert версия 2.013. Паспорт ФЛ 413.175.001 ПС. ТУ 4276-007-82237826-13. – URL: <https://subscribe.ru/archive/tech.tdndt/201406/16144652.html> (дата обращения: 12.10.2018).
6. Wilson J., Liu J., Karimian N., Davis C.L., Peyton A.J. Assessment of microstructural changes in Grade 91 power station tubes through permeability and magnetic Barkhausen noise measurements. – ECNDT 2014. October 6-10. 2014. Prague. Czech Republic.
7. Гурин, С.А. Сканеры-дефектоскопы серии «Комплекс-2»: новые модели [Текст] / С.А. Гурин, В.С. Жуков, С.В. Жуков, Н.Н. Копица // В мире НК. – 2004. – № 2 (24). – С. 31-33.
8. Барковский, С.С. Многомерный анализ данных методами прикладной статистики [Текст] / С.С. Барковский [и др.]. – Казань : Изд. КГТУ, 2010. – 126 с.
9. Lin J.M., Lin J.C., Sha H. A new nondestructive testing technique based on magnetic memory effect. – Chinese J. NDT. 2000. Vol. 22. No. 7. P. 297-299.
10. Жуков, С.В. К вопросу о необходимости измерения напряжений [Текст] / С.В. Жуков // Техническая диагностика и неразрушающий контроль – URL: <http://www.td.ru/content/view/68/20/>. -2007 (дата обращения: 12.10.2018).

REFERENCES

- [1] RD EO 1.1.2.11.0571.2015 Normy dopuskaemyh tolshchin stenok ehlementov truboprovodov iz ughlerodistykh stalej pri ehrozionno-korrozionnom iznose [1 RD EO 1.1.2.11.0571-2015 "Standarts of Allowable Wall Thicknesses of Carbon Steel Pipeline Elements during Erosion and Corrosion Wear"]. Moskva [Moscow], VNIAS. 2015. P. 210 (in Russian).
- [2] PNAE G-7-002-86 Normy rascheta na prochnost oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskix ustanovok (s izmeneniyami ot 10.07.87) [PNAE G-7-002-86 Standards for Strength Calculation of Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants (as amended July 10, 1987).] – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200037730> (in Russian).
- [3] PNAE G-10-012-89 Normy rascheta na prochnost stalnykh zashhitnykh obolochek atomnykh stancij [PNAE G-10-012-89 Standards for Strength Calculation of Steel Protective Shells of Nuclear Power Plants.]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200059848> (in Russian).

- [4] Raschet texnologicheskogo truboprovoda. Internet-resurs [Calculation of the Technological Pipeline. Internet Resource]. – URL: <https://proektanti.ru/user/work/34973> (in Russian).
- [5] Skaner mexanicheskix napryazhenij «STRESSVISION» Expert versiya 2.013 Passport FL 413.175.001 PS, TU 4276-007-82237826-13 [STRESSVISION Mechanical Stress Scanner Expert version 2.013. Passport FL413.175.001 PS, TU 4276-007-82237826-13]. URL: <https://subscribe.ru/archive/tech.tdndt/201406/16144652.html> (in Russian).
- [6] Wilson J., Liu J., Karimian N., Davis C.L., Peyton A.J. Assessment of microstructural changes in Grade 91 power station tubes through permeability and magnetic Barkhausen noise measurements. ECNDT 2014. October 6-10. 2014. Prague. Czech Republic.
- [7] Gurin S.A., Zhukov V.S., Zhukov S.V., Kopicza N.N. Skanery-defektoskopy serii «Kompleks-2»: novye modeli [Flaw Detector Scanners of the “Complex-2” Series: New Models]. V mire NK [In the World of NK]. – 2004. – № 2(24). – P. 31-33 (in Russian).
- [8] Barkovskij S.S. [i dr.]. Mnogomernyj analiz dannyx metodami prikladnoj statistiki [Multivariate Data Analysis Methods of Applied Statistics]. Kazan: Izd. KGTU [Kazan: KSTU Publishing House]. – 2010. – 126 p. (in Russian).
- [9] Lin J.M., Lin J.C., Sha H. A new non-destructive testing technique based on magnetic memory effect. Chinese J. NDT. 2000. Vol. 22. No. 7. P. 297-299.
- [10] Zhukov S.V. K voprosu o neobxodimosti izmereniya napryazhenij [On the Need for Measuring Stresses]. Texnicheskaya diagnostika i nerazrushayushij control [Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing]. – URL: <http://www.td.ru/content/view/68/20/-2007> (in Russian).

Assessment of Erosion and Corrosion Deterioration Development Using Magnetic Anisotropy Measurement Method

A.K. Adamenkov¹, I.N. Veselova², V.Y. Shpitser³

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

¹ ORCID iD: 0000-0001-7342-0231

WoS Researcher ID: O-1921-2018

e-mail: anri_61@mail.ru

² ORCID iD: 0000-0001-5867-5690

WoS Researcher ID: M-1893-2018

e-mail: INVeselova@mail.ru

³ ORCID iD: 0000-0002-5051-5091

e-mail: shpitser@mail.ru

Abstract – This article presents information on assessment of erosion and corrosion deterioration development of pipeline components using the magnetic anisotropy measurement method. The purpose of the research is fixing of locally stressed areas which are typical for local wall thinning in zones with probable erosion and corrosion deterioration and determination of magnetic anisotropy parameters as well as formation of measurement results database.

Keywords: pipelines, thickness, erosion and corrosion deterioration, magnetic anisotropy.

**КУЛЬТУРА БЕЗОПАСНОСТИ И
СОЦИАЛЬНО-ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ
ТЕРРИТОРИЙ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 343.52.6

**ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ЗА ХИЩЕНИЕ ИЛИ ВЫМОГАТЕЛЬСТВО
ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ**

© 2019 Н.С. Александрова

*Димитровградский инженерно-технологический институт – филиал Национального
исследовательского ядерного университета «МИФИ», Димитровград, Ульяновская область, Россия*

Для обеспечения ядерной и радиоактивной безопасности и защиты особо опасных объектов от потенциальных угроз в уголовном кодексе Российской Федерации предусмотрена ответственность за хищение либо вымогательство ядерных материалов и радиоактивных веществ. В статье приведен анализ данного преступления с учетом изменений, внесенных в действующее уголовное законодательство. Автором рассмотрены проблемы, связанные с применением анализируемого преступления и высказаны предложения по их законодательному решению.

Ключевые слова: радиоактивные вещества, ядерные материалы, хищение, вымогательство, специальная норма, корыстная заинтересованность, атомная энергия, предмет преступления, субъект, способ.

Поступила в редакцию 11.10.2018

После доработки 18.02.2019

Принята к публикации 28.02.2019

В УК РСФСР Указом Президиума Верховного Совета от 30 марта 1988 года был включен состав преступления, предусмотренный статьей 223.3 «Хищение радиоактивных материалов» [1]. Введение указанной статьи было обусловлено тем, что Организация Объединенных наций обязала в Конвенции о физической защите ядерного материала и ядерных установок создать преграды по предотвращению возможных хищений радиоактивных материалов. В статье 2А Конвенции указано «Каждое государство-участник создает, вводит и поддерживает надлежащий режим физической защиты, применимый к ядерному материалу и ядерным установкам, находящимся под его юрисдикцией, с целью: защиты от кражи и другого незаконного захвата ядерного материала при его использовании, хранении и перевозке» [2].

В действующем кодексе в статье 221 предусмотрена ответственность за хищение или вымогательство ядерных материалов и радиоактивных веществ [3]. Это специальная норма по отношению к преступлениям против собственности. Ядерные материалы и радиоактивные вещества исключаются из имущества, являющегося предметом хищений либо вымогательств как преступлений против собственности.

Первоначально в действующем кодексе предметом преступления выступали лишь радиоактивные материалы [4]. В Уголовном кодексе республики Беларусь только радиоактивные вещества выступают в качестве предмета хищения (статья 323) [5]. В части определения предмета преступления данная норма в уголовном кодексе Российской Федерации является бланкетной, поскольку определения предмета раскрыто в Федеральном законе от 21 ноября 1995 года «Об использовании атомной энергии». В статье 3 указанного закона определено: «Ядерные материалы – материалы, содержащие или способные воспроизвести делящиеся (расщепляющиеся) ядерные вещества; радиоактивные вещества это не относящиеся к ядерным материалам вещества, испускающие ионизирующее излучение» [5].

Разницу между ядерными материалами и радиоактивными веществами

законодатель определяет в зависимости от их физических и химических свойств. В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 19 июля 2007 года № 456 ядерными материалами являются:

а) обедненный уран – уран с содержанием изотопа урана-235 ниже, чем в природном уране;

б) облученный ядерный материал – ядерный материал, имеющий вследствие облучения нейтронами в ядерном реакторе или в другой ядерной установке мощность эквивалентной дозы излучения более 1 Зв/ч (100 бэр/ч) на расстоянии 1 м без биологической защиты;

в) природный уран – уран, содержащий по массе около 99,28 процента изотопа урана-238, около 0,71 процента изотопа урана-235 и около 0,01 процента изотопа урана-234;

г) слабооблученный ядерный материал – ядерный материал, имеющий вследствие облучения нейтронами в ядерном реакторе или в другой ядерной установке мощность эквивалентной дозы излучения менее или равную 1 Зв/ч (100 бэр/ч) на расстоянии 1 м без биологической защиты [6].

Перечень радиоактивных веществ дан в Письме ГТК РФ от 27.01.1997 №2-12/1441 «О временном размещении Госатомнадзора России при ввозе(вывозе) ядерных материалов и радиоактивных веществ» [7]. Например, полоний, цезий, висмут. В статье 3 ФЗ «Об использовании атомной энергии» к объектам использования атомной энергии кроме ядерных материалов и радиоактивных веществ указаны ядерное топливо, отработавшее ядерное топливо, радиационные источники радиоактивные отходы» [5].

Представляется, что перечень предмета преступления необходимо расширить.

Например, в статье 284 Уголовного кодекса Казахстана в качестве предмета преступления предусмотрены и радиоактивные отходы [8].

Кроме того, в действующем уголовном кодексе установлена ответственность за совершение иных преступлений, связанных с оборотом ядерных материалов или радиоактивных веществ. Это контрабанда радиоактивных веществ, радиационных источников и ядерных материалов (ст. 226.1 УК РФ); совершение акта терроризма с использованием ядерных материалов, радиоактивных веществ или источников радиоактивного излучения (статья 205 часть 3 пункт «а» УК РФ). Хищение и вымогательство ядерного оружия самостоятельно криминализовано в части 2 статьи. 226 УКРФ.

На наш взгляд, диспозицию части 1 статьи 221 УК РФ необходимо изложить следующим образом «Хищение либо вымогательство ядерных материалов, радиоактивных веществ, ядерных взрывных устройств, ядерного топлива, отработавшего ядерного топлива, радиационных источников, радиоактивных отходов».

Объективная сторона исследуемого преступления включает два альтернативных действия – хищение либо вымогательство. Под хищением понимается противоправное безвозмездное изъятие и (или) обращение лицом в свою пользу или пользу других лиц радиоактивных веществ или ядерных материалов. Если в главе 21 УК РФ способ совершения преступления является критерием классификации хищений чужого имущества, то в преступлении, предусмотренном статьей 221 УК РФ, хищение может быть совершено любым способом: тайно, открыто, насильственно или ненасильственно, путем обмана или злоупотребления доверием, то есть способ совершения преступления роли на квалификацию не играет [3]. В уголовном кодексе республики Беларусь в качестве квалифицирующего признака выделен такой способ, как разбойное нападение [4]. В статье 240 Уголовного кодекса Кыргызской Республики усилена ответственность, если «хищение или вымогательство радиоактивных

материалов совершены с применением насилия, опасного для жизни и здоровья» [5].

Вымогательство представляет собой требование передачи радиоактивных веществ и ядерных материалов под угрозой применения насилия или распространения сведений, позорящих лиц, в ведении или под охраной которых находятся радиоактивные вещества или ядерные материалы, или его близких, либо иных сведений, которые могут причинить существенный вред правам и законным интересам потерпевшего или его близких.

Оконченным хищение признается с момента завладения виновным лицом указанными веществами и получения возможности распорядиться ими по своему усмотрению.

Вымогательство признается оконченным с момента предъявления требования под угрозой совершения насильственных или иных действий о передаче ядерных материалов или радиоактивных веществ.

Если лицо путем хищения или вымогательства завладело радиоактивными веществами или ядерными материалами и в последующем хранило их, то оно будет нести ответственность по совокупности статей 220 и 221 УК РФ.

Субъектом преступления, предусмотренного статьей 221 УК РФ, является любое физическое вменяемое лицо, достигшее шестнадцатилетнего возраста. В случае совершения преступления лицом, которому радиоактивные вещества или ядерные материалы переданы (вверены) по службе, то действия виновного квалифицируются по статье 221 части 2 пункт «в» УК РФ. Субъективная сторона характеризуется виной в форме умысла. Мотивом при хищении ядерных материалов или радиоактивных веществ является корысть, а при вымогательстве возможны месть и иные побуждения.

В главе 21 Уголовного кодекса РФ при хищении либо вымогательстве чужого имущества предусмотрены квалифицирующие признаки – крупный и особо крупный размер. В статье 221 Уголовного кодекса Российской Федерации эти квалифицирующие признаки отсутствуют, однако они необходимы для обеспечения ядерной и радиоактивной безопасности и защиты особо опасных объектов от потенциальных угроз. Для хищения либо вымогательства такого имущества, как ядерные материалы или радиоактивные вещества, размер может быть определен, на наш взгляд, с учетом количества (объема) похищенного или вымогаемого предмета преступления, размер может быть указан в Постановлении Правительства РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президиума Верховного Совета РСФСР от 30 марта 1988 г // Ведомости ВС РСФСР, 1988. – № 14. – Ст. 396.
2. Конвенция о физической защите ядерного материала и ядерных установок, принятая ООН 26 октября 1979 г. // Действующее международное право. Т. 3. – Москва : Московский независимый институт международного права, 1997. – С. 30-38.
3. Уголовный кодекс Российской Федерации (с изм. на 29.07.2018) – Москва : Проспект, 2018. – 186 с.
4. Федеральный закон от 09.02.1999 № 26 – ФЗ «О внесении изменений и дополнения в Уголовный кодекс Российской Федерации» // Российская газета. – № 27. – 12.02.1999.
5. Уголовный кодекс республики Беларусь [Электронный ресурс]. – URL: <http://pravo.kulichki.com/vip/uk/00000024.htm> (дата обращения 08.10.2018).
6. Уголовный кодекс Кыргызской Республики [Электронный ресурс]. – URL: <http://cbd.minjust.gov.kg/act/view/ru> (дата обращения 08.10.2018).
7. Федеральный закон от 21 ноября 1995 г. № 170 – ФЗ «Об использовании атомной энергии» (с изм. от 3 августа 2018 г.) // Российская газета. – № 230. – 28.11.1995.
8. Постановление Правительства РФ от 19 июля 2007 г. № 456 (ред. 05.07. 2018) Об утверждении Правил физической защиты ядерных материалов, ядерных установок и пунктов хранения ядерных материалов // Собрание законодательства РФ. – 30.07.2007. – № 31. – ст. 4081.
9. Письмо ГТК РФ от 27.01.1997г. № 2-12/1441 «О временном размещении Госатомнадзора России при ввозе (вывозе) ядерных материалов и радиоактивных веществ» (официально не был опубликован) // [Электронный ресурс]. – URL: <http://base.garant.ru/738046/> (дата обращения: 08.10.2018).

10. Уголовный кодекс Казахстана. – Москва : Юрист, 2015. – 228 с.

REFERENCES

- [1] Ukaz Prezidiuma Verhovnogo Soveta RSFSR ot 30 marta 1988 g [The Decree of the of the Supreme Soviet Presidium of the RSFSR, March 30, 1988]. Vedomosti VS RSFSR [Gazette of the Supreme Soviet of the RSFSR]. 1988. № 14. Art. 396 (in Russian).
- [2] Konvenciya o fizicheskoy zashchite yadernogo materiala i yadernyh ustanovok, prinyataya OON 26 oktyabrya 1979 g. [Convention on the Physical Protection of Nuclear Material and Facilities adopted by the UN on 26 October 1979]. Dejstvuyushchee mezhdunarodnoe pravo [Existing International Law]. Moskva. Moskovskij nezavisimyj institut mezhdunarodnogo prava [Moscow Independent Institute of International Law]. Vol. 3. 1997. P. 30-38 (in Russian).
- [3] Ugolovnyj kodeks Rossijskoj Federacii (s izm. na 29.07.2018) [The Russian Federation Criminal Code (as amended on 29.07 2018.)] Moskva. Prospekt [Moscow. Prospectus] 2018. 186 p. (in Russian).
- [4] Federal'nyj zakon ot 09.02.1999 № 26 - FZ "O vnesenii izmenenij i dopolneniya v Ugolovnyj kodeks Rossijskoj Federacii" [The Federal Law of 09.02.1999 № 26 - The Federal law "About Amendments and Additions to the Russian Federation Criminal Code"]. Rossiyskaya Gazeta [The Russian Newspaper]. № 27, 12.02.1999 (in Russian).
- [5] Ugolovnyj kodeks respubliki Belarus' [The Republic of Belarus Criminal Code]. URL: <http://pravo.kulichki.com/vip/uk/00000024.htm> (in Russian).
- [6] Ugolovnyj kodeks Kyrgyzskoj Respubliki [Criminal Code of the Kyrgyz Republic]. URL: <http://cbd.minjust.gov.kg/act/view/ru> (in Russian).
- [7] Federal'nyj zakon ot 21 noyabrya 1995 g. № 170 – FZ "Ob ispol'zovanii atomnoj energii" (s izm. ot 3 avgusta 2018 g.) [The Federal Law of November 21, 1995 № 170 – The Federal law "The Use of Atomic Energy" (as amended from August 3, 2018)]. Rossiyskaya Gazeta [The Russian Newspaper]. № 230. 28.11.1995 (in Russian).
- [8] Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 19 iyulya 2007 g. № 456 (red. 05.07.2018) Ob utverzhdenii Pravil fizicheskoy zashchity yadernyh materialov, yadernyh ustanovok i punktov hraneniya yadernyh materialov [Resolution of the Russian Federation Government of July 19, 2007 № 456 (ed. 05.07.2018) Approval of the Rules of Physical Protection of Nuclear Materials, Facilities and Nuclear Material Storage Facilities] Sobranie zakonodatel'stva RF [Collection of the Russian Federation Legislation], 30.07.2007. № 31. Art. 4081 (in Russian).
- [9] Pis'mo GTK RF ot 27.01.1997g. № 2-12/1441 "O vremennom razmeshchenii Gos-atomnadzora Rossii pri vvoze (vyvoze) yadernyh materialov i radioaktivnyh veshchestv" (oficial'no ne byl opublikovan) [The Letter of the State Customs Committee of the Russian Federation of 27.01.1997 No. 2-12 // 1441 "Temporary Placement of Gosatomnadzor of Russia at Import (Export) of Nuclear Materials and Radioactive Substances"(it wasn't published officially)]. URL: <http://base.garant.ru/738046/> (accessed 08.10.2018) (in Russian).
- [10] Ugolovnyj kodeks Kazahstana [Criminal Code of Kazakhstan]. Moskva. Yurist [Moscow. Lawyer]. 2015. 228 p. (in Russian).

Responsibility for Stealing or Extortion of Nuclear Materials and Radioactive Substances

N.S. Aleksandrova

Dimitrovgrad engineering and technological Institute the branch of the National Research Nuclear University "MEPhI", Kuibyshev St., 294, Dimitrovgrad, Ulyanovsk region, Russia 433512

ORCID iD: 0000-0002-0499-2161

WoS Researcher ID: T-5294-2018

e-mail: nadezhdaleksandrova@yandex.ru

Abstract – The Russian Federation Criminal Code provides for responsibility for stealing or extortion of nuclear materials and radioactive substances in order to ensure nuclear and radioactive safety and protection of especially dangerous objects from potential threats. The article presents an analysis of this crime taking into account the changes made to the current criminal legislation. The author considers the problems associated with the use of the analyzed crime and makes proposals for their legislative solution.

Keywords: radioactive substances, nuclear materials, stealing, extortion, special rule, self-interest, nuclear energy, subject of the crime, subject, method.

**КУЛЬТУРА БЕЗОПАСНОСТИ И
СОЦИАЛЬНО-ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ
ТЕРРИТОРИЙ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 378.4 : 331.546 : 621.039

**К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТИВНЫХ ПРАКТИКАХ ПОДГОТОВКИ
КАДРОВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ЭКСПОРТООРИЕНТИРОВАННОЙ
СТРАТЕГИИ ГК «РОСАТОМ»**

© 2019 В.А. Руденко, М.В. Головки, Ю.А. Евдошкина, Н.П. Василенко

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

Статья посвящена обоснованию ведущей роли опорных вузов Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» (далее ГК «Росатом») и их региональных филиалов на территориях расположения объектов атомной энергетики в формировании у будущих работников атомных станций в России и за рубежом высокого уровня культуры безопасности во всех ее проявлениях – техническом, социокультурном, экономическом. Необходимость анализа эффективных инструментов актуализируется развитием экспортоориентированной стратегии ГК «Росатом». Анализ данных социологических опросов, исторических справок, материалов, предоставленных организациями, предыдущих исследований коллектива авторов, позволил выявить эффективный подход к формированию культуры безопасности у иностранных студентов. В его основе – многостороннее сотрудничество образовательной организации с промышленными предприятиями дивизионов ГК «Росатом», машиностроительного кластера, а также ее специализация в рамках распределенного кампуса опорного вуза госкорпорации.

Ключевые слова: культура безопасности, ГК «Росатом», АО «Концерн Росэнергоатом», экспортоориентированная стратегия, ресурсный центр, подготовка кадров.

Поступила в редакцию 14.12.2018
После доработки 25.12.2018
Принята к публикации 10.01.2019

В настоящее время происходят регионально-страновые изменения в распространении атомной генерации. Наиболее динамичное распространение атомной энергетики происходит в странах Азиатско-Тихоокеанского региона, в Африке, Латинской Америке, на Ближнем Востоке, с приоритетом проектов сооружения АЭС «под ключ». Основным трендом для Госкорпорации по атомной энергии «Росатом» (далее – ГК «Росатом») является продвижение и реализация системного продукта за рубежом. Так, например, новыми продуктами для российского и международного рынка одного из участников интегрированного предложения ГК «Росатом» на внешнем рынке сооружения АЭС за рубежом, – АО «Концерн Росэнергоатом», – являются:

- сервисные услуги для различных типов генерирующих объектов;
- производство изотопной продукции;
- развитие направления «Центр обработки данных»;
- вывод энергоблоков атомных станций из эксплуатации и обращение с радиоактивными отходами (далее – РАО);
- сбыт электроэнергии¹.

¹ По данным годового отчета Акционерного общества «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях» (АО «Концерн Росэнергоатом»). – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://media.rssp.ru/document/1/1/6/16ff8e706b06f3ed6cccd62a53ab2171.pdf>

Проводимая ГК «Росатом» активная экспансия на международные рынки требует соответствующей кадровой поддержки. Это становится одним из основных вопросов планирования экспортоориентированной стратегии ГК «Росатом». Сегодня госкорпорация может предоставить полный жизненный цикл национальной атомной программы, так называемый «страновой план», который подготовлен и разработан с партнерами из Иордании, Бангладеш и из других стран [1]. Помимо технико-технологической инфраструктуры учитывается и «мягкая инфраструктура», включающая нормативно-правовую базу, планы по ликвидации аварий, на случай чрезвычайных ситуаций, а также неотъемлемый элемент – развитие человеческого капитала. Так, кроме уникальных технологий во всем ядерном цикле – от добычи до бэк-энда, для строящихся АЭС следует обеспечить формирование ответственности и принципиальной позиции в сфере безопасности и эффективности функционирования всех объектов атомной отрасли не только в стране их присутствия, но и за пределами. Например, «экспорт» корпоративных ценностей ГК «Росатом» будет способствовать не только обеспечению физической безопасности и сохранности объектов атомной энергетики, но и экономической эффективности их функционирования [2-3]. Безопасность – это наднациональная категория. Многочисленные исследования, посвященные глобальным проблемам, связанным с авариями на Чернобыльской АЭС, Три-Майл-Айленд, Фукусима, это подтвердили [4-13]. Согласно позиции А.А. Богданова, безопасность системы определяется ее равновесностью в условиях организационного триединства «вещей, людей и идей» [14]. Интеграция этих элементов происходит в рамках системы управления, где они занимают определенное место в ее структуре и в качестве субъекта, и объекта управления, а также опосредующей их взаимодействие информации, перемещающейся по каналам прямой и обратной связи. Именно поэтому для атомной отрасли крайне важно выступать не только экспортером технико-технологических материальных объектов, но и обеспечивать поставку специфического «товара», коим являются критически важные знания, а также те, кто их будет использовать – персонал с соответствующей квалификацией.

Еще в 2017 году в качестве перспективного направления в учебном процессе проректор по международной деятельности АНО ДПО «Техническая академия Росатома» В. Артисюк обозначил исследования в сфере культуры безопасности, работу на обеспечение восприятия и следования единым нормам и правилам, принятым на уровне международного сообщества, в различных национальных культурах. Несмотря на то, что сформирована нормативно-правовая и организационно-методическая основа обеспечения безопасности, есть ряд специфических особенностей, которые необходимо учитывать при обучении иностранных студентов и специалистов. Речь идет о различиях в национальных культурах, традициях, стереотипах поведения.

Подготовка кадров для ядерной индустрии в эпоху глобализации требует новых решений, основанных на лучших российских практиках. Максимальное повышение надежности и безопасности атомной энергетики во всем мире обеспечивается за счет оценки, сравнения с лучшими достижениями, посредством взаимной поддержки, обмена информацией и использования положительного опыта. По мнению генерального директора Института управления ядерными знаниями МАГАТЭ Я. Янева, трансфер знаний является важнейшим фактором эффективности пуска АЭС в любой стране. В подтверждение своих слов он приводит в пример работу советских специалистов на пуске энергоблока болгарской АЭС «Козлодуй» [15].

Для решения вопросов кадрового обеспечения внешнеэкономической стратегии ГК «Росатом» в указанных направлениях, предполагается эффективная внутрикорпоративная ротация кадров:

- отток высококвалифицированных специалистов для работы по внешнеэкономическим проектам из сформированного кадрового резерва;
- замещение командируемых за счет притока молодых специалистов-выпускников отраслевых вузов;
- переподготовка и повышение квалификации специалистов для решения новых задач и включения в новые направления развития ГК Росатом.

С целью подготовки кадров и организации эффективных форм передачи положительного опыта созданы две ассоциации – Ассоциация «Консорциум опорных вузов Госкорпорации «Росатом» и Национальный ядерный инновационный консорциум. Сегодня именно в опорных вузах ГК «Росатом» формируется специализированная ресурсная матрица, в которой содержатся технические, законодательно-правовые, организационные компетенции, знания по культуре поведения и проч.

В рамках указанных трендов развития ГК «Росатом» должны выстраиваться стратегии университетов и их структурных подразделений, являющихся основными поставщиками HR-потенциала для предприятий ее контура. Как отмечает руководитель проекта отдела оценки и развития персонала Департамента подготовки персонала И. Шаповалова, АО «Концерн «Росэнергоатом» работает с опорными вузами атомной отрасли, выделяя в качестве ключевых партнеров НИЯУ МИФИ и его региональные филиалы в г. Волгодонске и г. Обнинске [16]. Поэтому одной из основных задач НИЯУ МИФИ является повышение эффективности подготовки высококвалифицированных кадров для предприятий атомной отрасли по профильным специальностям в интересах усиления позиций университета и ГК «Росатом» на мировом рынке ядерных технологий в странах присутствия. Одним из инструментов решения этой задачи становится развитие ресурсных центров и организация практик студентов. Это стратегическое консолидированное мероприятие ГК «Росатом» и опорных вузов, позволяющее решить проблемы повышения качества профессионального обучения студентов и специалистов атомной отрасли путем:

- обеспечения проведения практик российских и иностранных студентов;
- обеспечения проведения повышения квалификации и профессиональной переподготовки работников предприятий ГК «Росатом»;
- разработки и включения в образовательный процесс учебно-методических материалов для практико-ориентированного обучения студентов и повышения квалификации работников отрасли.

Региональный филиал НИЯУ МИФИ в г. Волгодонске – ВИТИ НИЯУ МИФИ, – обладает уникальными возможностями для решения вышеуказанных задач в рамках стратегических целей ГК «Росатом» и НИЯУ МИФИ. На территории города расположены предприятия трех дивизионов ГК «Росатом» – электроэнергетический, машиностроительный, инжиниринговый дивизионы (рис. 1).

Результатом длительного эффективного сотрудничества ВИТИ НИЯУ МИФИ с предприятиями указанных дивизионов ГК «Росатом» (Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция», «Волгодонскатомэнергоремонт» – филиал АО «Атомэнергоремонт», Волгодонский филиал «Ростоватомтехэнерго» АО «Атомтехэнерго», предприятия Волгодонского промышленного кластера атомного машиностроения и др.) стало формирование и укрепление специфических «брендов» вуза, качественно отличающих его от других вузов региона и структурных подразделений головного вуза. Эти бренды с успехом могут быть использованы (а ряд из них уже реализуется в рамках совместных проектов) для целей атомной отрасли. Приведем пример использования брендов для кадровой поддержки экспортоориентированной стратегии,

координируемой в АО «Концерн Росэнергоатом» департаментом международного бизнеса и развития и АО «Русатом Сервис» (табл. 1).



Рисунок 1 – Пример эффективных форм взаимодействия отраслевых вузов с промышленными партнерами [An example of effective forms of industry universities and industrial partners interaction]

Таблица 1 – Бренды ВИТИ НИЯУ МИФИ для реализации экспортоориентированной стратегии АО «Концерн «Росэнергоатом» [VETI MEPhI brands for Rosenergoatom Concern export-oriented strategy implementation]

Основные продуктовые предложения «Сервис АЭС за рубежом»	Функции и задачи АО «Концерн «Росэнергоатом»»	Бренд ВИТИ НИЯУ МИФИ для формирования HR-потенциала экспортоориентированной стратегии предприятий ГК «Росатом»
1	2	3
Ядерная инфраструктура	Организация и проведение семинаров и экспертных миссий по передаче российского опыта в создании и использовании ЯИ	– Ежегодная международная научно-практическая конференция «Безопасность ядерной энергетики»; – Научно-практический журнал «Глобальная ядерная безопасность» (входит в Перечень ВАК РФ) с глубиной архива 8 лет.

Продолжение таблицы 1

1	2	3
Подготовка персонала	Организация и проведение обучения технического персонала, специалистов и руководителей ядерной отрасли и организаций: – Эксплуатирующий персонал. – Персонал ПНР и ремонтный. Обучение ядерной инфраструктуре для ключевых стейкхолдеров заказчика. Дополнительное профессиональное образование.	– Подготовка студентов по профильным для предприятий направлениям и специальностям. – Практико-ориентированная подготовка иностранных студентов в Ресурсном центре ГК «Росатом» - НИЯУ МИФИ (далее – Ресурсный центр). – Центр профессиональных компетенций. – Становление научной школы «Культура безопасности на предприятиях атомной энергетики» (подготовка кандидатских диссертаций, публикации в ведущих научных изданиях по указанной тематике).
Ввод в эксплуатацию	Разработка, согласование и передача заказчику организационной, пусконаладочной и эксплуатационной документации. Предэксплуатационный контроль состояния оборудования.	– Научно-исследовательский институт «Атомного энергетического машиностроения» ВИТИ НИЯУ МИФИ (далее – НИИ АЭМ), выполняет НИР и НИОКР по темам: 1) диагностический мониторинг электроприводного оборудования; 2) поставка диагностических комплексов для АЭС и заводов-изготовителей; 3) разработка комплектной документации для ТОиР; 4) разработка методического обеспечения диагностирования; 5) разработка и поставка программного обеспечения; 6) обследование оборудования АЭС и оценка его остаточного ресурса.
Эксплуатация	Работы по корректировке эксплуатационной документации энергоблоков. Продление сроков эксплуатации. Подготовка и проведение ремонтов.	– Направления подготовки специалистов для АО «Концерн «Росэнергоатом»». – НИИ АЭМ. – Взаимодействие с Волгодонским промышленным кластером атомного машиностроения.
Тренажеры	Подготовка документации и проекта для создания и функционирования аварийного, информационного, учебно-тренировочного и др. центров.	– Ресурсный центр. – Центр профессиональных компетенций. – База учебно-методических материалов по подготовке специалистов в Учебно-тренировочном подразделении филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция»
Сервис	Техническое обслуживание и ремонт (ТОиР). Продление срока эксплуатации.	– НИИ АЭМ

Далее рассмотрим подробно указанные бренды. В 2015 г. по инициативе ГК «Росатом» на базе ВИТИ НИЯУ МИФИ и предприятий ГК «Росатом», расположенных в г. Волгодонске, был создан Ресурсный центр ГК «Росатом» – НИЯУ МИФИ (далее – Ресурсный центр). В Ресурсном центре осуществляется практико-ориентированное обучение иностранных студентов на действующих установках и полномасштабном оборудовании, расположенном на производственных площадках предприятий ГК «Росатом» (Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция» и др.) и предприятий Волгодонского промышленного кластера атомного машиностроения (табл. 2).

Таблица 2 – Производственные и лабораторные площадки Ресурсного центра и содержание практик [Resource Center production and laboratory sites and content of practices]

Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск	Учебно-тренировочное подразделение Ростовской АЭС	Волгодонский промышленный кластер атомного машиностроения	ВИТИ НИЯУ МИФИ
– изучение конструкции реактор ВВЭР-1000;	– изучение процесса перегрузки топлива на реакторе ВВЭР-1000 (на тренажере СУМП-В-1000);	– изучение конструкций вспомогательного оборудования АЭС;	– изучение методов и приборов диагностики и исследования оборудования АЭС;
– изучение конструкции парогенератора ПГВ 1000М;	– управление с полномасштабного тренажера оборудованием реакторного и турбинного отделений;	– осуществление металлографических исследований и физико-механических испытаний изделий энергетического машиностроения;	– выполнение сварных соединений в лаборатории сварочных технологий;
– изучение конструкции компенсатора давления;	– моделирование аварийной ситуации на ПМТ;	– поведение испытаний и исследований на стойкость к межкристаллитной коррозии и стилокопирование элементов оборудования АЭС;	– неразрушающий контроль образцов сварных соединений.
– изучение конструкции гидроемкости САОЗ;	– управление энергоблоком с полномасштабного тренажера;	– Проведение исследований результатов спектрального анализа (определение химического состава металла);	
– ультразвуковой контроль шпилек реактора;		– радиографический контроль элементов оборудования для АЭС и исследование его результатов.	
– капиллярный контроль уплотнительных поверхностей;			
– капиллярный контроль вокруг гнезд шпилек корпуса реактора.			

Помимо обучения на производственных площадках указанных предприятий, работа Ресурсного центра ведется в формате тренингов, направленных на командообразование, на формирование принципов культуры безопасности и

лояльности корпоративным ценностям. В этом случае, опыт ценностноориентированного подхода к управлению человеческим капиталом, накопленный ГК «Росатом», ложится в основу всех элементов «мягкой» инфраструктуры, поставляемой в рамках зарубежных проектов госкорпорации.

В первый год своей работы Ресурсный центр принял 5 отечественных студентов как пилотную группу, в 2016 г. прошли практику 80 иностранных студентов из трех стран – Монголия, Вьетнам, Иордания. В 2017 г. – 124 иностранных студента более, чем из 10 стран, в 2018 г. – 186 иностранных студентов более, чем из 15 стран. В дальнейшем численность будет увеличиваться (рис. 2).

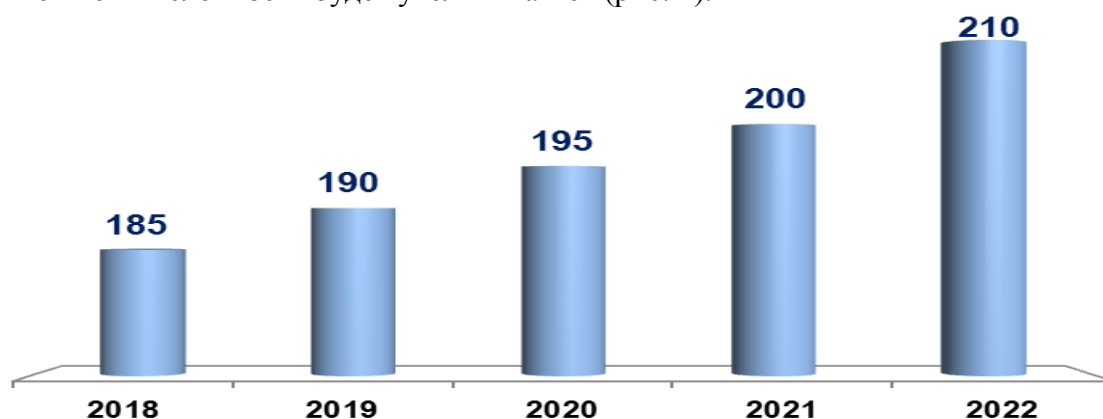


Рисунок 2 – Прогнозируемая динамика численности иностранных студентов в Ресурсном центре ГК «Росатом» – НИЯУ МИФИ в г. Волгодонске в период 2018-2022гг., чел. [The projected dynamics of the number of foreign students in the Resource Center of the State Corporation “Rosatom” - NRNU MEPhI in Volgodonsk in the period of 2018-2022]

Положительная динамика связана не только с высокой эффективностью практик и профессионализмом преподавателей Ресурсного центра, но и в целом с ростом привлекательности российского образования для иностранцев по различным причинам. Так, согласно социологическим опросам, основным мотивом, по мнению 51,6% респондентов, стало отсутствие в той или иной стране образовательных программ по интересующему профилю (направлению, специальности). Выбор НИЯУ МИФИ для 63,7% опрошенных был обусловлен высокими качеством образования в вузе, а также направлениями иностранных министерств образования (14,8%) и направления на обучение от организации, компании (14,4%). Выбор ядерной специализации преобладает среди иностранных студентов следующих стран: страны Европы – 100%, арабские страны (89,8%), страны Азии (79,1%), страны Африки (77,8%), Латинской Америки (77,8%). Определяющая причина – высокий уровень ее конкурентоспособности на рынке труда в силу таких факторов, как:

- высокий престиж специальности – 47,9%;
- соответствие способностям – 31,0%;
- легкость трудоустройства – 29,6%;
- высоко оплачивается – 22,0%;
- направили учиться по этой специальности – 22,0% [17].

Указанные факторы во многом являются следствием реализации экспортоориентированной стратегии ГК «Росатом» в ряде перечисленных групп стран. Развитие атомной отрасли, строительство объектов атомной энергетики, создание инфраструктуры – все это способствует повышению конкурентоспособности и престижа отдельных направлений подготовки специалистов, более внимательного отношения к процессу обучения у студентов, формированию высокого уровня

ответственности за объем и качество получаемых знаний.

Практики в Ресурсном центре организованы таким образом, что иностранные и отечественные студенты знакомятся с производством и процессами на всех предприятиях дивизионов, что дает возможность сформировать комплексное видение всей системы – от строительства АЭС и изготовления оборудования для станции – до пуска ее в эксплуатацию. Особое внимание уделяется анализу и оценке культуры безопасности на каждом объекте. Высокий уровень безопасности не может быть обеспечен только на действующей АЭС при ее эксплуатации. Это закладывается еще при обучении будущих специалистов в вузах, а также на всех этапах – от производства до эксплуатации. На каждом объекте она специфична в проявлении, но одинакова в содержании – высочайший уровень персональной ответственности за тот участок работы, который выполняет сотрудник. В данном направлении ведутся исследования и уже накоплен положительный опыт реализации компетентностного подхода в воспитании культуры безопасности отечественных студентов вуза, что с соответствующей адаптацией передается иностранным студентам – будущим работникам АЭС за рубежом [18-19].

Для перспектив дальнейшего развития Ресурсного центра как площадки подготовки кадров для зарубежных АЭС на основе ценностного подхода и ценностных ориентиров, реализуемых на всех объектах и во всех сферах присутствия предприятий ГК «Росатом», можно использовать такие бренды ВИТИ НИЯУ МИФИ, как НИИ АЭМ и международная научно-практическая конференция «Безопасность ядерной энергетики».

Научно-исследовательский институт «Атомного энергетического машиностроения», входящий в структуру ВИТИ НИЯУ МИФИ, обладает серьезным опытом в организации НИР и НИОКР по обеспечению эксплуатационной надёжности и безопасности оборудования и систем АЭС и других энергетических объектов по следующим темам:

- диагностический мониторинг электроприводного оборудования;
- поставка диагностических комплексов для АЭС и заводов-изготовителей;
- разработка комплектной документации для ТОиР;
- разработка методического обеспечения диагностирования;
- разработка и поставка программного обеспечения;
- обследование оборудования АЭС и оценка его остаточного ресурса.

Эти направления отражают технико-технологические аспекты культуры безопасности и являются крайне актуальными для строящихся атомных станций за рубежом, особенно российского дизайна. Дальнейшее развитие научно-исследовательской деятельности ведется в соответствии с ключевым трендом цифровизации экономики по темам, предполагающим использование VR/AR-технологий, в том числе, для программ кадровой подготовки и переподготовки. Эти технологии могут стать отдельным продуктом, который ГК «Росатом» предложит и российскому, и зарубежному рынку, что будет способствовать сохранению его лидирующего положения на мировом рынке.

Иностранные студенты, проходящие практику в Ресурсном центре, принимают участие в научных мероприятиях, проводимых на площадке ВИТИ НИЯУ МИФИ с участием представителей предприятий-партнеров, а магистранты имеют возможность представить результаты своих исследований и наблюдений, которые они осуществляют, в том числе, во время практики на производственных площадках, на научно-практической конференции «Безопасность ядерной энергетики». Научное мероприятие посвящено актуальным проблемам и перспективам развития атомной отрасли в России и за рубежом, в ней участвуют ведущие российские и зарубежные

ученые. Архив конференции составляет четырнадцать лет и является серьезным конкурентным фактором для научного мероприятия со специфической тематикой. Это позволяет исследователям обмениваться уникальным опытом по выполнению научно-исследовательских работ по заказам предприятий ГК «Росатом» в области обеспечения эксплуатационной надёжности и безопасности оборудования и систем АЭС и других энергетических объектов, в сфере обучения персонала АЭС, способствуя тем самым «экспорту» не только достижений прикладных исследований на строящиеся зарубежные объекты, но и всей системы ценностных ориентиров ГК «Росатом» как условия эффективного развития и безопасности всех создаваемых объектов [20] (рис. 3).

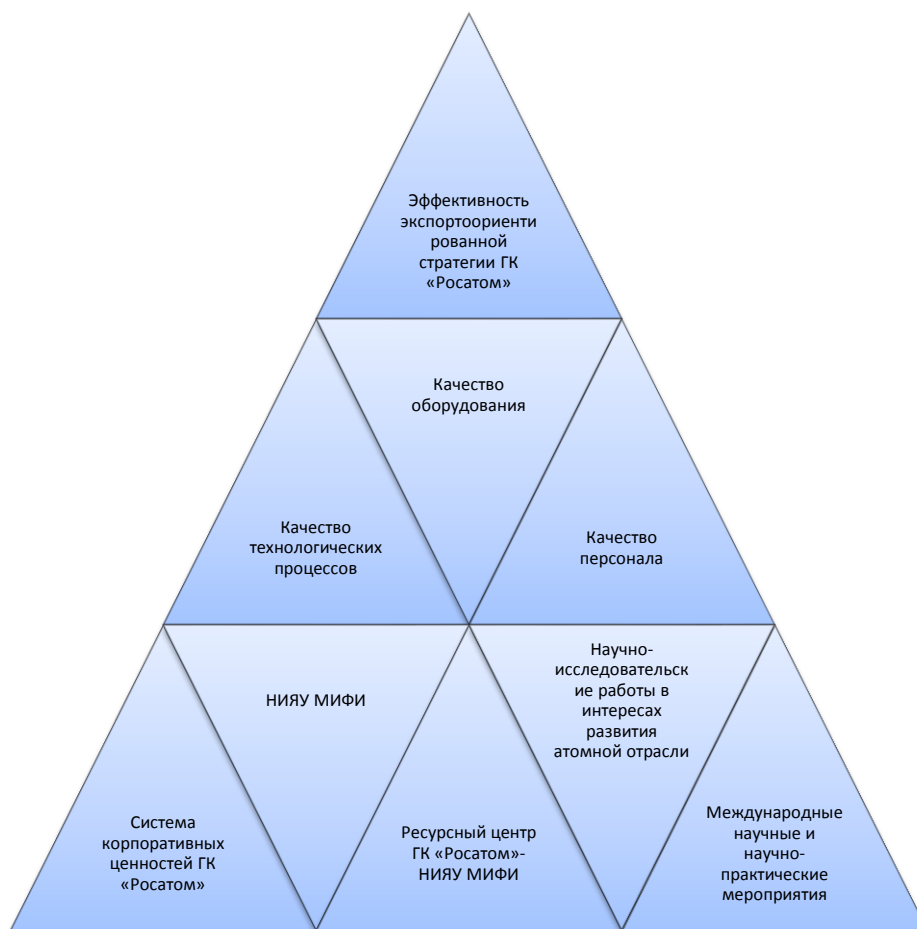


Рисунок 3 – Факторы успеха экспортоориентированной стратегии ГК «Росатом» [Success factors of the Rosatom export-oriented strategy]

Таким образом, развитие в странах-партнерах ГК «Росатом» «мягкой инфраструктуры» наряду с технико-технологической, позволяет обеспечивать на вновь строящихся объектах высокий уровень культуры безопасности на основе достижения трех значимых качеств: качество технологических процессов, включая их безопасность и четкость технического оформления, документационного сопровождения; качество оборудования, определяемое его инновационным уровнем, эксплуатационной надежностью и безопасностью; качество персонала на основе воспитания и образования, профессионализма, идеологии и приверженности миссии организации, что в совокупности формирует высокий уровень корпоративной культуры и безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кадры. Пройти не поскользнуться [Текст] // Росэнергоатом. – 2017. – № 7. – С. 27.
2. Головкин, М.В. Корпоративные ценности в системе устойчивого развития и безопасности экономики промышленных предприятий (на примере ГК «Росатом») [Текст] / М.В. Головкин, В.А. Руденко // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – № 4 (17). – С. 103-114.
3. Головкин, М.В. Развитие культуры экономической безопасности как инструмент борьбы с рентоориентированной теневой экономикой [Текст] / М.В. Головкин // Современность: хозяйственные алгоритмы и практики: монография под ред. Ю.М. Осипова, В.Ю. Стримова, Е.С. Зотовой. – Москва ; Тамбов : Издательский дом ТГУ им. Г.Р. Державина, 2016. – С. 407-411.
4. The annual report for 1986 (IAEA). International Atomic Energy Agency: официальный сайт. – 1987. – URL : http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC31/GC31Documents/English/gc31-800_en.pdf - N.03.2017 (дата обращения: 21.11.2018)
5. Развитие культуры безопасности в ядерной деятельности: Практические советы по достижению прогресса. Серия «Отчеты по безопасности», МАГАТЭ [Текст]. – Вена, 1998.
6. Three Mile Island Accident. World Nuclear Association, March 2001.
7. Walker, J. Samuel Three Mile Island: A Nuclear Crisis in Historical Perspective Berkeley: University of California Press, 2004, 231 p.
8. Абрамова В.Н. Психологические методы в работе с кадрами на АЭС [Текст] / В.Н. Абрамова [и др.] – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 192 с.
9. Бадяев, В.В. Охрана окружающей среды при эксплуатации АЭС [Текст] / В.В. Бадяев, Ю.А. Егоров, С.В. Казаков. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 224 с.
10. Лозановская, И.Н. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении [Текст] / И.Н. Лозановская, Д.С. Орлов, Л.К. Садовникова. – Москва, 1998.
11. Львов, Л.В. Надежность и экологическая безопасность гидроэнергетических установок [Текст] / Л.В. Львов, М.П. Федоров, С.Г. Шульман. – Санкт-Петербург, 1999. – 440 с.
12. Ключевые вопросы практики повышения культуры безопасности: INSAG-15 [Текст] / Доклад Международной консультативной группы по ядерной безопасности. – Вена : Международное агентство по атомной энергии, 2002. – 24 с.
13. Жук, А.В. Отечественная и зарубежная историография проблем культуры безопасности в атомной энергетике/ А.В. Жук, М.В. Головкин, Ю.А. Евдошкина // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 1 (22). – С. 113-121.
14. Богданов, А.А. Тектология: всеобщая организационная наука [Текст] / А.А. Богданов. – Москва : Экономика, 1989. – С. 106.
15. Янев, Я. Вызовы и возможности [Текст] / Я. Янев // Росэнергоатом. – 2017. – № 9. – С. 39.
16. Шаповалова, И. Карьера начинается в школе [Текст] / И. Шаповалова // Росэнергоатом. – 2018. – № 10. – С. 41.
17. Дмитриев, Н.М. Подготовка специалистов для атомной промышленности зарубежных стран в НИЯУ МИФИ [Текст] / Н.М. Дмитриев, П.А. Арефьев. – Москва : ЦСПиМ, 2018. – 264 с.
18. Руденко, В.А. Компетентностный подход в воспитании культуры безопасности в вузе [Текст] / В.А. Руденко, Н.П. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. – 2012. – № 2-3(4). – С. 136-141.
19. Руденко, В.А. Практические методы формирования приверженности культуре безопасности на индивидуальном уровне у студентов вуза [Текст] / В.А. Руденко, Н.П. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – № 1 (6). – С. 100-103.
20. Руденко, В.А. Ценностная составляющая культуры безопасности [Текст] / В.А. Руденко, Н.П. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – № 4 (9). – С. 82-86.

REFERENCES

- [1] Kadry`. Projti ne poskol`znut`sya [Personnel. Go not to Slip]. Rose`nergoatom [Rosenergoatom]. 2017. № 7. P. 27 (in Russian).
- [2] Golovko, M.V., Rudenko V.A. Korporativny`e cennosti v sisteme ustojchivogo razvitiya i bezopasnosti e`konomiki promy`shlenny`x predpriyatij (na primere GK «Rosatom») [Corporate Values in the System of Sustainable Development and Economic Security of Industrial Enterprises (on the example of Rosatom)]. Global`naya yadernaya bezopasnost` [Global nuclear safety]. 2015. № 4 (17). P. 103-114 (in Russian).
- [3] Golovko, M.V. Razvitie kul`tury` e`konomicheskoy bezopasnosti kak instrument bor`by` s rentoorientirovannoj tenevoj e`konomikoj [Development of Economic Security Culture as a Tool to

- Combat Rent-Oriented Shadow Economy]. *Sovremennost': xozyajstvenny'e algoritmy` i praktiki: monografiya* [Modernity: Economic Algorithms and Practices: monograph]. Moskva ; Tambov : Izdatel'skiy dom TGU im. G.R. Derzhavina [Moscow ; Tambov : Publishing house of Derzhavin TSU.] 2016. P. 407-411 (in Russian).
- [4] The annual report for 1986 (IAEA). International Atomic Energy Agency: официальный сайт. – 1987. URL : http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC31/GC31Documents/English/gc31-800_en.pdf – 11.03.2017.
- [5] Razvitie kul'tury` bezopasnosti v yadernoj deyatel'nosti: Prakticheskie sovery` po dostizheniyu progressa [Development of Safety Culture in Nuclear Activities: Practical Advice on Progress]. Seriya «Otchet` po bezopasnosti» [A series of "Safety Reports"]. MAGATE ` [IAEA]. Vena [Vienna], 1998.
- [6] Three Mile Island Accident. World Nuclear Association, March 2001.
- [7] Walker J. Samuel Three Mile Island: A Nuclear Crisis in Historical Perspective Berkeley: University of California Press, 2004, 231 p.
- [8] Abramova V.N. [and others] Psixologicheskie metody` v rabote s kadrami na AE`S [Psychological Methods in the Work with Personnel at Nuclear Power Plants]. Moskva [Moscow]. E`nergoatomizdat. 1988. 192 p. (in Russian).
- [9] Badyaev V.V., Egorov Yu.A., Kazakov S.V. Oxrana okruzhayushhej sredy` pri e`kspluatatsii AE`S [Environmental Protection during Operation of Nuclear Power Plants]. Moskva [Moscow]. E`nergoatomizdat. 1990. 224 p. (in Russian).
- [10] Lozanovskaya I.N., Orlov D.S., Sadovnikova L.K. E`kologiya i ohrana biosfery` pri ximicheskom zagryaznenii [Ecology and Conservation of the Biosphere under Chemical Pollution]. Moskva [Moscow]. 1998. (in Russian).
- [11] L`vov L.V. Fedorov M.P., Shul'man S.G. Nadezhnost` i e`kologicheskaya bezopasnost` gidroe`nergeticheskix ustanovok [Reliability and environmental safety of hydropower plants] Sankt-Peterburg [St. Petersburg]. 1999. 440 p. (in Russian).
- [12] Klyuchevy`e voprosy` praktiki povы'sheniya kul'tury` bezopasnosti: INSAG-15 [Key Issues of Safety Culture Improvement Practice]. Doklad Mezhdunarodnoj konsul'tativnoj grupy` po yadernoj bezopasnosti [Report of the International Advisory Group on Nuclear Safety]. Vena : Mezhdunarodnoe agentstvo po atomnoj e`nerg [Vienna : International Nuclear Energy Agency]. 2002. 24 p.
- [13] Zhuk A.V., Golovko M.V., Evdoshkina Yu.A. Otechestvennaya i zarubezhnaya istoriografiya problem kul'tury` bezopasnosti v atomnoj e`nergetike [Domestic and Foreign Historiography of Safety Culture Problems in Nuclear Power Engineering]. Global'naya yadernaya bezopasnost` [Global Nuclear Safety]. 2017. № 1 (22). P. 113-121 (in Russian).
- [14] Bogdanov A.A. Tektologiya: vseobshhaya organizacionnaya nauka [Tectology: Universal Organizational Science]. Moskva : E`konomika [Moscow : Economy]. 1989. P. 106 (in Russian).
- [15] Yanev Ya. Vy`zovy` i vozmozhnosti [Challenges and Opportunities]. 2017. № 9. P. 39 (in Russian).
- [16] Shapovalova I. Kar`era nachinaetsya v shkole [Career Starts at School]. Rose`nergoatom. 2018. № 10. P. 41 (in Russian).
- [17] Dmitriev N.M., Aref`ev P.A. Podgotovka specialistov dlya atomnoj promy`shlennosti zarubezhny`x stran v NIYaU MIFI [Training of Specialists for the Nuclear Industry of Foreign Countries in MEPhI]. Moskva : CzSPiM [Moscow : CSEM] 2018. 264 p. (in Russian).
- [18] Rudenko V.A., Vasilenko N.P. Kompetentnostny`j podxod v vospitanii kul'tury` bezopasnosti v vuze [Competence Approach in the Education of Safety Culture at the University]. Global'naya yadernaya bezopasnost` [Global Nuclear Safety]. 2012. № 2-3(4). P. 136-141 (in Russian).
- [19] Rudenko V.A., Vasilenko N.P. Prakticheskie metody` formirovaniya priverzhennosti kul'ture bezopasnosti na individual`nom urovne u studentov vuza [Practical Methods of Formation of Commitment to the Safety Culture at the Individual Level of University students]. Global'naya yadernaya bezopasnost` [Global Nuclear Safety]. 2013. № 1 (6). P. 100-103 (in Russian).
- [20] Rudenko V.A., Vasilenko N.P. Cennostnaya sostavlyayushhaya kul'tury` bezopasnosti [Value Component of Safety Culture]. Global'naya yadernaya bezopasnost` [Global Nuclear Safety]. 2013. № 4 (9). P. 82-86 (in Russian).

Effective Training Practices for Rosatom Export-Oriented Strategy Implementation V.A. Rudenko¹, M.V. Golovko², Y.A. Evdoshkina³, N.P. Vasilenko⁴

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI",
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

¹ORCID iD: 0000-0002-6698-5469

WoS Researcher ID: B-7730-2016

e-mail: VARudenko@mephi.ru

²ORCID iD: 0000-0002-4835-9800

WoS Researcher ID: J-2461-2016

e-mail: MVGolovko@mephi.ru

³ORCID iD: 0000-0002-6704-0643

WoS Researcher ID: G-8379-2017

e-mail: YAEvdoshkina@mephi.ru

⁴ORCID iD: 0000-0001-7054-1302

WoS Researcher ID: G-4963-2017

e-mail: NPVasilenko@mephi.ru

Abstract – The article is devoted to the substantiation of the leading role of the supporting universities of the Rosatom State Nuclear Energy Corporation (Rosatom State Corporation) and their regional branches in the territories where nuclear power facilities are located in the formation of a high level of safety culture among future nuclear plant staff in Russia and abroad in technical, socio-cultural and economic aspects. The need to analyze effective tools is updated by the development of Rosatom State Corporation export-oriented strategy. Analysis of data from sociological surveys, historical references, materials provided by organizations, and previous researches by a group of authors revealed an effective approach to building a safety culture among foreign students. It is based on the multilateral cooperation of the educational organization with the industrial enterprises of the Rosatom Group of Companies, the machine-building cluster as well as its specialization within the framework of the distributed campus of the state institution high school.

Keywords: safety culture, Rosatom State Corporation, Rosenergoatom Concern JSC, export-oriented strategy, resource center, personnel training.

ЮБИЛЕИ

29 марта 2019 года отмечает свое 70-летие член редколлегии журнала «Глобальная ядерная безопасность», автор множества статей, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные и управляющие системы» Волгодонского инженерно-технического института НИЯУ МИФИ Валерий Вольфович Кривин.



Кривин Валерий Вольфович
Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Информационные
и управляющие системы» ВИТИ НИЯУ
МИФИ

Окончив Львовский политехнический институт в 1979 году, В.В. Кривин прошел славный путь от слесаря контрольно-измерительных приборов на турбомоторном заводе до заместителя руководителя по информатизации и заведующего кафедрой «Информационные и управляющие системы» одного из ведущих инженерных вузов юга России.

На протяжении полувековой профессиональной биографии В.В. Кривин успешно трудился в должности конструктора, впоследствии ведущего конструктора на заводе «Электрон», начальником лаборатории программно-математического обеспечения ВПО «Атоммаш», старшим научным сотрудником кафедры Волгодонского института и ведущим инженером Волжского СМУ – АСУ производственного объединения «Автоматика» в г. Волгодонске. Защитил кандидатскую, а впоследствии докторскую диссертацию и уже в течение почти 8-ми лет возглавляет одну из ведущих кафедр Волгодонского инженерно-технического института в составе Национального

исследовательского ядерного университета «МИФИ».

В.В. Кривин активно участвует в обеспечении высокого уровня, качества и эффективности образовательной, научной, инновационной, социальной и хозяйственной деятельности; популяризации атомной энергетики в молодежных кругах; стратегическом сотрудничестве с предприятиями и организациями-партнерами и целевой подготовке специалистов по заказам работодателей, внедрении в образовательный процесс инновационных образовательных технологий; создании и расширении компьютеризированных учебных лабораторий по направлениям; разработке программ повышения квалификации по ИТ-направлениям; в развитии направления магистерской программы «Системный анализ и управление». В.В. Кривин является организатором и руководителем научно-исследовательской лаборатории. Он успешно руководит научной работой студентов и аспирантов, является рецензентом множества научных работ. Под его руководством защищаются кандидатские диссертации. В.В. Кривин опубликовано более 100 научных (в т.ч. монография) и учебно-методических работ.

Помимо преподавательской деятельности, В.В. Кривин ведет активную работу по вовлечению в атомную отрасль талантливой молодежи: участвует в профориентационной деятельности ВИТИ НИЯУ МИФИ, ориентируя тем самым

учащихся старших классов на выбор инженерной профессии. На протяжении нескольких лет является членом жюри городской конференции «Академия юных исследователей», экспертом в региональном молодежном инновационном конвенте в номинации «Лучший инновационный продукт».

Заслуги В.В. Кривина перед обществом и государством оценены по достоинству. Валерий Вольфович – Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, он имеет Благодарность Госкорпорации «Росатом» за многолетний добросовестный труд, значительные личные успехи в научно-исследовательской деятельности, большой вклад в развитие атомной отрасли, Благодарность председателя Законодательного собрания Ростовской области. Неоднократно отмечен Почетными грамотами и благодарственными письмами ректора НИЯУ МИФИ М.Н. Стриханова, главы Администрации г. Волгодонска и председателя Волгодонской городской Думы, наградами других официальных лиц.

Валерий Вольфович Кривин – удивительный человек: умнейший, талантливейший, в высшей степени интеллигент, в нем сочетаются твердость, принципиальность с одной стороны и мягкость, душевность с другой. Его уважают коллеги, почитают студенты, любят друзья и близкие.

Коллектив редакции журнала поздравляет Валерия Вольфовича с юбилеем и желает крепкого здоровья на долгие годы, счастья, благополучия, новых профессиональных успехов и достижений.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ НОМЕРА

Абидова Е.А.	106	Сысоев И.А.	67
Абу Сондос М.А.	39	Увакин М.А.	90
Адаменков А.К.	113	Ульянов А.Н.	25
Александрова Н.С.	120	Федоренко Д.Н.	101
Бейсуг О.И.	106	Чернов А.В.	106
Благин А.В.	106	Чернов Н.И.	74
Бродягина Т.В.	47	Шпицер В.Я.	113
Бугакова А.В.	74		
Бутырлагин Н.В.	74		
Василенко Н.П.	124		
Верещагина Д.В.	16		
Веселова И.Н.	113		
Гладков Э.А.	47		
Головко М.В.	124		
Губеладзе А.Р.	7		
Губеладзе О.А.	7		
Гусев Д.А.	67		
Дембицкий А.Е.	67		
Дёмин В.М.	39		
Драка О.Е.	106		
Евдошкина Ю.А.	124		
Заяров Ю.В.	59		
Катаев В.Ф.	67		
Киселев Александр С.	25		
Киселев Алексей С.	25		
Кулаков Д.В.	16		
Кравченко П.Д.	101		
Косогова Ю.П.	101		
Лунева Е.В.	16		
Макушенко М.Е.	16		
Медведев В.Н.	25		
Науменко Г.А.	59		
Перковский Р.А.	47		
Пимшин Ю.И.	59		
Прокопенко Н.Н.	74		
Рахман С.К. Анисур	90		
Руденко В.А.	124		
Савандер В.И.	39		
Симакова Н.А.	47		
Скорикова М.И.	25		
Смолин А.Ю.	67		
Стрижов В.Ф.	25		

AUTHOR INDEX OF VOL. 1, 2019

Abidova E.A.	106	Sysoev I.A.	67
Abu Sondos M.A.	39	Vasilenko N.P.	124
Adamenkov A.K.	113	Vereshchagina E.A.	16
Aleksandrova N.S.	120	Veselova I.N.	113
Beysug O.I.	106	Ul'yanov A.N.	25
Blagin A.V.	106	Uvakin M.A.	90
Brodyagina T.V.	47	Zayrov Yu.V.	59
Bugakova A.V.	74		
Butyrlagin N.V.	74		
Chernov A.V.	106		
Chernov N.I.	74		
Dembickij A.E.	67		
Demin V.M.	39		
Draka O.E.	106		
Evdoshkina Yu.A.	124		
Fedorenko D.N.	101		
Gladkov Eh.A.	47		
Golovko M.V.	124		
Gubeladze A.R.	7		
Gubeladze O.A.	7		
Gusev D.A.	67		
Kataev V.F.	67		
Kiselev Aleksandr S.	25		
Kiselev Aleksei S.	25		
Kosogova Yu.P.	101		
Kravchenko P.D.	101		
Kulakov D.V.	16		
Luneva E.V.	16		
Makushenko M.E.	16		
Medvedev V.N.	25		
Naumenko G.A.	59		
Perkovskij R.A.	47		
Pimshin Yu.I.	59		
Prokopenko N.N.	74		
Rahman SK Anisur	90		
Rudenko V.A.	124		
Savander V.I.	39		
Shpitser V.Y.	113		
Simakova N.A.	47		
Skorikova M.I.	25		
Smolin A.Yu.	67		
Strizhov V.F.	25		

NOTES FOR AUTHORS

(Dear authors, the editors of the journal draw your attention to some changes in the rules of the article preparation)

The full text of article intended for publication should be signed by authors, it has to be followed by application from the institution where the work is made, resolution on publication possibility. One file consists of one paper which has the following:

- UDC index;
- the title, the structured abstract (200-250 words) and keywords in Russian and English (not less than 10 speech units);
- the list of references in Russian and English;
- information about the authors in Russian and English (a surname, a name, a middle name, a work place, a position, an academic degree, a rank, postal address, and E-mail address, contact phone; specify who to be corresponded with;
- a file with information about place of employment in Russian and English, including the postal address and index (specify the place of employment of each author);
- ORCID и Researcher ID index of each author (<http://orcid.org> и <http://www.researcherid.com>).

The article should be structured: introduction (review of problems, objective of work); theory of the issue; a detailed presentation of the methods of conducting experiments, a description of materials and methods of analysis, statistical processing is desirable; the discussion of the results; conclusion. It is enough to describe the objective of the work and the results obtained for articles of a production nature.

The article should contain only the most necessary formulas, it is desirable to abandon the intermediate calculations. The equation editor of Equation 3.0 is recommended to record the formulas. All formulas are aligned to the center of the page, numbered in parentheses on the right and referred to in the text of the article. Inclusion of tables in the article should be appropriate. Tables should be numbered and headings in Russian and English (10 pf). It is desirable that the tables do not exceed one page of text. Figures should be clear when printing in black and white, numbered, figure captions in Russian and English (10 pf), have links in the text and be accompanied by justifications and conclusions. The units of measurement should be given in accordance with the International System (SI).

An article should be processed in the Microsoft Office 97-2003 Word 7.0 format, 12 point font Times New Roman; print - 1 interval. Please do not use signs of forced transfer and additional gaps. Page parameters: all sides are 2,5 cm. The volume of article has to be no more than 15 pages of the typewritten text, including tables, drawings (no more than 10) and the list of references (12-20 sources). If the text of the article is less than 2500 type characters, it may not be considered. It is necessary to check the articles through the Antiplagiat program, allowable borrowing and self-citation – no more than 20%.

In order to improve the quality and objectivity of publications, the authors are intended to reflect the advanced scientific experience of foreign countries, Russia and the CIS on the subject matter in the articles. The bibliography should be in accordance with State Standard Specification (GOST) 7.1-2003 “Bibliographic Record and Bibliographic Description. General Requirements and Drafting rules” (and its later version of 2008). References should include at least 12 sources (no more than 3 references to your own articles). There should be obligatory at least 5 sources later than 2016, and at least 4 references to foreign studies of recent years (from foreign countries, outside the former USSR). References are given at the end of article in order they mentioned. References are highlighted with square brackets. References to foreign sources are given in the original language and are accompanied, in case of translation into Russian, with indication of the translation. Textbooks, reference books, guidelines and recommendations are not included in the list of references. References are provided separately (see the guidelines in “The List of References Standard in English”). The bibliography in English should be issued according to **Scopus** standard specification. Indicate article **DOI** if it in the presence.

To accept an article in the journal you should provide the following materials:

- an article file in Word format;
- the same file in pdf format signed by the author;
- separate files of all pictures in the bmp, jpeg or gif formats;
- application from the institution where the work is made;
- expert resolution on publication possibility.

Personal copy can be obtained in the editorial office of the journal.

THE LIST OF REFERENCES STANDARD IN ENGLISH

For journals:

[1] Berela A.I., Bylkin B.K., Tomilin S.A., Fedotov A.G. Analiz i predstavlenie sredy deystviya v sisteme proektirovaniya tehnologii demontazha oborudovaniya pri vyvode iz ekspluatatsii bloka AES [The analysis and representation of the action environment in system of technology design of equipment dismantle during NPP unit taking out of operation] [Global nuclear safety]. 2014. № 1(10). P. 25-31 (in Russian).

[2] Lobkovskaya N.I., Evdoshkina Yu.A. Professional'noe celepolaganie kak sostavlyayushhaya kul'tury bezopasnosti budushhego specialista-atomshhika [Professional Goal-Setting as a Component of the Safety Culture of a Future Nuclear Specialist]. Sovremennoe obrazovanie [Modern Education]. 2017. № 1. P. 32-38. URL: http://e-notabene.ru/pp/article_22498.html (in Russian).

For books:

[3] Mogilev V.A., Novikov S.A. Faykov Yu.I. Tekhnika vzryvnogo eksperimenta dlya issledovaniya mekhanicheskoy stoykosti konstruktsiy. [Explosive experiment techniques for research of mechanical firmness of designs]. Sarov. FGUP "RFYaTs-VNIIEF" [Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics]. 2007. 215 p. (in Russian).

For web-resources:

[4] Strategia razvitiya transportnogo kompleksa Rostovskoy oblasti do 2030 goda [Development strategy of a transport complex of the Rostov region till 2030]. Officialnij sait Ministerstva transporta Rostovskoy oblasti [Official site of the Transport Ministry of Rostov region]. 2015. URL: <http://mindortrans.donland.ru/Default.aspx?pageid=107384> (in Russian).

For foreign references:

[5] Gulyaev M., Bogorovskaia S., Shapkina T. The Atmospheric air condition in Rostov Oblast and its effect on the population health // Scientific enquiry in the contemporary world: theoretical basics and innovative approach. CA. USA. B&M Publishing. 2014. P. 56-60.

For materials of conferences:

[6] Gerasimov S.I., Kuzmin V.A. Issledovaniye osobennostey initsirovaniya svetochuvstvitelny vzryvchatykh sostavov nekogerentnym izlucheniym [Research of features of initiation are photosensitive explosive structures incoherent radiation] [Works of the International conference "16 Haritonov's scientific readings"]. Sarov. FGUP "RFYaTs-VNIIEF" [Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics]. 2014. P. 90-93 (in Russian).

For materials of conferences (foreign references):

[7] Ishikawa M. et al. Reactor decommissioning in Japan: Philosophy and first programme. «N power performance and safety. Conference proceedings. Vienna, 28 September – 2 october 1987. V. 5. Nuclear Fuel Cycle». IAEA. Vienna. 1988. P. 121-124.

Editorial office address (for sending printed correspondence):

347360, Russia, Rostov region, Volgodonsk, Lenin Street, 73/94

Editorial office of "Global Nuclear Safety" journal

E-mail: oni-viti@mephi.ru

Tel: +79281883628

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

(уважаемые авторы, редакция журнала обращает ваше внимание на некоторые изменения правил оформления статей)

Полный текст статьи, предназначенной для опубликования, должен быть подписан авторами и сопровождаться представлением от учреждения, в котором выполнена работа, и экспертным заключением о возможности опубликования. В одном файле помещается одна статья, частью которой является:

- индекс УДК;
- название, структурированная аннотация (200-250 слов) и ключевые слова (не менее 10-и речевых единиц) на русском и английском языках;
- список литературы на русском и английском языках;
- сведения об авторах на русском и английском языках: ФИО, место работы, должность, ученая степень, звание, домашний, служебный и электронный адреса, телефон; указать, с кем вести переписку;
- индексы ORCID и Researcher ID для каждого автора (<http://orcid.org> и <http://www.researcherid.com>)

Статья должна быть структурирована: введение (обзор проблем, цель работы); теория вопроса; подробное изложение методики проведения опытов, описание материалов и методов анализа, желательна статистическая обработка; обсуждение результатов; заключение. Для статей производственного характера достаточно описать цель работы и полученные результаты.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться. Для записи формул рекомендуется применять редактор Equation 3.0. Все формулы выравниваются по центру страницы, нумеруются в круглых скобках по правому краю и упоминаются в тексте статьи. Включение таблиц в статью должно быть целесообразным. Таблицы нумеруются и имеют заголовки на русском и английском языках (10 пт). Желательно, чтобы таблицы не превышали одной страницы. Рисунки должны быть понятными при черно-белой печати, с нумерацией, подписями на русском и английском языках (10 пт), иметь ссылки в тексте и сопровождаться обоснованиями и выводами. Единицы измерения следует давать в соответствии с Международной системой (СИ).

Статья оформляется в Microsoft Office 97-2003 Word 7.0 через 1 интервал, шрифтом Times New Roman, размером 12 пт, без знаков принудительного переноса и дополнительных пробелов. Поля со всех сторон – 2,5 см. Объем статьи – не более 15 страниц машинописного текста, включая таблицы и рисунки (не более 10-и), список литературы (12-20 источников). Если в тексте статьи менее 2500 знаков, статья может не рассматриваться. Необходима проверка статей через программу антиплагиата, допустимые заимствования и самоцитирование – не более 20%.

С целью повышения качества и объективности публикаций авторы призваны отражать в статьях передовой научный опыт стран дальнего зарубежья, России и СНГ по рассматриваемой проблематике. Библиография оформляется согласно ГОСТу 7.1-2003 «Библиографическая запись и библиографическое описание. Общие требования и правила составления» (и его более поздней версии 2008 года). Список литературы включает не менее 12-и источников (из них не более 3-х ссылок на собственные работы), с обязательным включением как минимум 5-и источников позднее 2016 г., и не менее 4 ссылок на зарубежные (из стран дальнего зарубежья, за пределами бывшего СССР) исследования последних лет. Список литературы приводится в конце статьи в порядке упоминания в тексте в квадратных скобках номера источника. Ссылки на иностранные источники даются на языке оригинала и сопровождаются, в случае перевода на русский язык, указанием на перевод. Учебники, учебные пособия, методические указания и рекомендации не включаются в список литературы. References приводятся после списка литературы на русском языке (правила оформления см. в разделе The list of references standard in English). Библиография на английском языке должна быть оформлена в соответствии со стандартом Scopus. Укажите артикул DOI, если он есть.

Для принятия статьи в номер журнала необходимо предоставить следующие материалы:

- файл со статьей в формате Word;
- этот же файл в формате pdf с подписью авторов;
- отдельными файлами все рисунки из статьи в форматах bmp, jpeg или gif;
- экспертное заключение о возможности опубликования.

Авторский экземпляр можно получить в редакции журнала.

ПРИМЕРЫ ОФОРМЛЕНИЯ ЛИТЕРАТУРЫ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

Для книг с одним автором:

Кесслер, Г. Ядерная энергетика [Текст] / Г. Кесслер ; пер. с англ. : Ю.И. Митяев. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 264 с.

Для книг с двумя и более авторами:

Емельянов, И.Я. Управление и безопасность ядерных энергетических реакторов [Текст] / И.Я. Емельянов, П.А. Гаврилов, Б.Н. Селивестров. – Москва : Атомиздат, 1975. – 280 с.

Для журналов с одним автором:

Петров, Н.Н. Принципы построения образовательных программ и личностное развитие учащихся [Текст] / Н.Н. Петров // Вопросы психологии. – 1999. – № 3. – С. 39.

Для журналов с двумя и более авторами:

Евдошкина, Ю.А. Практико-ориентированная технология формирования культуры безопасности выпускников, ориентированных на работу в атомной отрасли [Текст] / Ю.А. Евдошкина, В.А. Руденко // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 4 (25). – С. 122-129.

Для диссертаций:

Дзякович, Е.В. Стилистический аспект современной пунктуации : автореф. дис. канд. филол. наук [Текст] / Е.В. Дзякович. – Москва, 1984. – 30 с.

Для депонированных работ:

Кондраш, А.Н. Пропаганда книг [Текст] / А.Н. Кондраш. – Москва, 1984. – 21 с. – Деп. в НИЦ «Информпечать» 25.07.84. ФН 176.

Описание архивных материалов:

Гущин, Б.П. Журнальный ключ [Текст] // НРЛИ. Ф. 209. Оп. 1. Д. 460. Л. 9.

Материалы конференций:

Шишков, Ю. Россия и мировой рынок: структурный аспект [Текст] / Ю. Шишков // Социальные приоритеты и механизмы преобразований в России: материалы междунар. конф. Москва, 12-13 мая 1998 г. – Москва : Магма, 1993. – С. 19-25.

Для патентов:

Пат. 2187888 Российская Федерация, МПК7 Н 04 В 1/38, Н 04 J 13/00. Приемопередающее устройство [Текст] / Чугаева В. И. ; заявитель и патентообладатель Воронеж. науч.-исслед. ин-т связи. – № 2000131736/09 ; заявл. 18.12.00 ; опубл. 20.08.02, Бюл. № 23 (II ч.). – 3 с.

Для авторских свидетельств:

А. с. 1007970 СССР, МКИЗ В 25 J 15/00. Устройство для захвата неориентированных деталей типа валов / В. С. Ваулин, В. Г. Кемайкин (СССР). – № 3360585/25-08 ; заявл. 23.11.81 ; опубл. 30.03.83, Бюл. № 12. – 2 с.

Для электронных ресурсов:

Дирина, А.И. Право военнослужащих РФ на свободу ассоциаций [Электронный ресурс] / А.И. Дирина // Военное право: сетевой журн. – 2010. – №2. – URL : <http://voennoepravo.ru/node/2149> (дата обращения: 01.08.2018).

Адрес редакции журнала (для отправки печатной корреспонденции):

347360, Россия, Ростовская область, г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94. Редакция журнала «Глобальная ядерная безопасность».

E-mail: oni-viti@mephi.ru

Тел.: +79281883628

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

2019, 1(30)

Главный редактор – **М.Н. Стриханов, доктор физико-математических наук, профессор**

Сдано в набор 14.03.2019 г.

Компьютерная верстка Вишнева М.М.

Подписано к печати 21.03.2019 г.

Бумага «SvetoCory» 80 г/м². Объем 15,84 усл.печ.л.

Гарнитура «TimesNewRoman»,

Тираж 300 экз.

Отпечатано в типографии ВИТИ (ф) НИЯУ МИФИ