

NATIONAL RESEARCH NUCLEAR UNIVERSITY MEPhI

GLOBAL NUCLEAR SAFETY

2020, 4(37)

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*)

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

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

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

2020, 4(37)

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 (№ 759)

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 Анджеж, 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. Гок, 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. Пимшин, 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)

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)

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

2020, 4(37)

THE PROBLEMS OF NUCLEAR, RADIATION AND ECOLOGICAL SAFETY

The Investigation of Fire Effects to Structural Elements of a Mobile Unit with a Compact Nuclear Power Plant

O.A. Gubeladze, A.R. Gubeladze..... 7

Cosmogenic Beryllium-7 in the Earth Atmosphere

E.A. Buraeva, V.S. Malyshevsky, V.I. Ratushny..... 17

Analysis of the Environmental Safety of Copper Ions Delivery to Surface Water Bodies from Nuclear Plants

O.I. Gorskaya, I.A. Bublikova, V.M. Sapelnikov..... 30

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

Geology, Tectonics and Stratigraphy of the Construction Site of the New Bushehr NPP Units in the Islamic Republic of Iran as Part of Recent Geotechnical Studies

V.Yu. Ulyanov..... 39

Metrological Standardization of High-Precision Electronic Tacheometers Using a Precision Laser Tracker

T.M. Pimshina, D.M. Arseniev, I.Yu. Pimshin..... 53

A Variant of Application of Removable Lever for Turning Ellipsoid Bottoms of NPP Hull Equipment

P.D. Kravchenko, Y.P. Kosogova, M.A. Gashneva, A.F. Kovalev..... 60

NUCLEAR FACILITIES EXPLOITATION

Molten Salt Reactors with Thermal and Fast Spectrum for Minor Actinides Transmutation

O. Ashraf, G.V. Tikhomirov..... 68

The Identification of Pre-Failure Conditions of Oil Coolers of NPP MCP by Operating Parameters

V.V. Krivin, V.Ya. Shpicer, V.A. Tolstov, I.O. Ishigov..... 82

Assessment of Stress-strain State of NPP Pipeline Metal Parts and Elements

A.K. Adamenkov, I.N. Veselova..... 91

Tolerant Fuel for WWER-1200 Reactors with High Thermal Conductivity

A.Z. Alhmoud, V.B. Kruglov, H.A. Tanash..... 97

**SAFETY CULTURE, SOCIO AND LEGAL ASPECTS OF TERRITORIAL
DEVELOPMENT OF NUCLEAR FACILITIES LOCATION**

Implementation of Coaching Approach to Formation, Maintenance and Development of
Safety Culture at the «Rosatom» State Corporation Enterprises

V.A. Rudenko, Yu.A. Evdoshkina, I.S. Vasilenko.....103

Features of High-Quality Mathematical Training in the Context of Online Education of
Students Oriented to Work in the Nuclear Industry

N.P. Vasilenko, N.I. Chabanova.....113

Author Index of vol. 4, 2020124

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 4(37), 2020

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

- Исследование пожарного воздействия на элементы конструкции подвижного агрегата с малогабаритной ядерной энергетической установкой
О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе 7
- Космогенный бериллий-7 в земной атмосфере
Е.А. Бураева, В.С. Малышевский, В.И. Ратушный 17
- Анализ экологической безопасности поступления ионов меди в поверхностные водоемы от атомных станций
О.И. Горская, И.А. Бубликова, В.М. Сапельников 30

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

- К вопросу о геологии, тектонике и стратиграфии площадки строительства новых блоков АЭС Бушер в исламской республике Иран в свете геотехнических исследований последних лет
В.Ю. Ульянов 39
- Метрологическое эталонирование высокоточных электронных тахеометров при помощи лазерного трекера прецизионной точности
Т.М. Пимшина, Д.М. Арсеньев, И.Ю. Пимшин 53
- Вариант применения съемного рычага захвата кантования эллипсоидных днищ корпусного оборудования АЭС
П.Д. Кравченко, Ю.П. Косогова, М.А. Гашнева, А.Ф. Ковалев 60

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

- Жидкосолевыми реакторы с тепловым и быстрым спектром для трансмутации минорных актинидов
О. Ашраф, Г. В. Тихомиров 68
- Идентификация предотказных состояний маслоохладителей ГЦН АЭС по параметрам эксплуатации
В.В. Кривин, В.Я. Шпицер, В.А. Толстов, И.О. Ишигов 82
- Оценка напряженно-деформированного состояния металла элементов и деталей трубопроводов АЭС
А.К. Адаменков, И.Н. Веселова 91

Толерантное топливо для реакторов ВВЭР-1200 с высокой теплопроводностью
А.З. Альхмуд, В.Б. Круглов, Х.А. Танаи.....97

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

Реализация коучингового подхода при формировании, поддержании и развитии культуры безопасности на предприятиях ГК «Росатом»
В.А. Руденко, Ю.А. Евдошкина, И.С. Василенко 103

Особенности качественной математической подготовки в условиях онлайн-обучения студентов, ориентированных на работу в атомной отрасли
Н.П. Василенко, Н.И. Чабанова 113

Авторский указатель номера 4(37), 2020 123

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 536.2:614.83:623.454:662.22

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЖАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭЛЕМЕНТЫ
КОНСТРУКЦИИ ПОДВИЖНОГО АГРЕГАТА С
МАЛОГАБАРИТНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
УСТАНОВКОЙ**

© 2020 О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе

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

За первые двадцать лет XXI-го века произошел целый ряд вооруженных конфликтов различного характера, в том числе и с участием государств, имеющих ракетно-ядерное оружие. В статье проводится исследование одного из этапов развития аварийной ситуации, связанной с пожаром, возникшим в результате воздействия обычных средств поражения, на подвижной пусковой установке с твердотопливной баллистической ракетой. Выполнено моделирование теплового воздействия на корпус ракеты и транспортно-пусковой контейнер, проведен анализ результатов расчета и эксперимента.

Ключевые слова: баллистическая ракета, пусковая установка, транспортно-пусковой контейнер, твердое ракетное топливо, пожар, тепловой поток, температурное поле.

Поступила в редакцию 05.09.2020

После доработки 20.10.2020

Принята к публикации 26.10.2020

Современная международная обстановка сопряжена с вооруженными конфликтами различного характера, в том числе и с участием государств, имеющих ракетно-ядерное оружие [1-3]. В этом случае следует ожидать поражение пусковых установок ракет обычными средствами авиации, крылатыми ракетами морского базирования, а также диверсионно-разведывательными формированиями [4].

Подвижные пусковые установки (ПУ) при воздействии противника могут оказаться в зоне действия пожара, что приведет к возгоранию агрегата с ракетой. Само ядерное горючее не может стать источником пожара или взрыва. Однако в ядерных боеприпасах (ЯБП) содержится значительное количество обычного химического взрывчатого вещества (ВВ). В состав головных частей могут входить дополнительные устройства, содержащие пирозаряды и твердое топливо. Поэтому в аварийных случаях оснащение ракет следует рассматривать как, безусловно, взрывоопасный элемент. Ракетное топливо также является пожаро- и взрывоопасным. Температуры, развивающиеся при его горении, могут достигать тысячи градусов. При аварийных ситуациях (АС), в которых начинается неконтролируемое горение основных элементов ракетного топлива, речь может идти лишь о локализации пожара, а не о его тушении в обычном понимании этого слова.

Для исследования воздействия пожара на подвижный ядерно- и радиационно опасный объект из перечня возможных этапов развития АС [5] выбраны представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Этапы развития аварийной ситуации [The stages of development of an emergency situation]

№ этапа	Этап	Перечень параметров вторичных воздействий
Э-5	Пожар агрегата с ЯБП	температура, давление; продолжительность воздействия; скорость выброса ГЧ из контейнера ПУ
Э-7	Срабатывание пожаро-взрывоопасных элементов ЯБП	Динамическое и тепловое воздействия (скорость удара; масса и форма элементов; перегрузка на узлах ЯБП; химический состав топлива; температура; давление; продолжительность действия)
Э-13	Взрыв, сгорание	

Рассматривались варианты подвижных ПУ баллистических ракет иностранных государств как с транспортно-пусковым контейнером (ТПК), так и без него (рис. 1).



Рисунок 1 – Подвижные пусковые установки с баллистическими ракетами наземного базирования
a – без ТПК (Индия); *б* – с ТПК (КНДР) [Mobile launchers with land-based ballistic missiles
a – without transport and launch container (India); *b* – with transport and launch container (DPR Korea)]

Проведено исследование воздействия пожара на корпус твердотопливного ракетного двигателя и ТПК, а также рассмотрена вероятность возгорания ВВ ядерного заряда. Для определения распределения температур в конструкции был разработан ряд математических моделей, а также реализована программа экспериментальных исследований.

Аналитические методы позволяют получить решения, по которым можно легко проанализировать влияние всех факторов на результаты. Из множества решений необходимо выбрать, характеризующее конкретный рассматриваемый процесс, а для этого задаются геометрические, физические и краевые условия, которые сформулированы таким образом, чтобы задача имела только одно решение. Основная сложность расчета нестационарных тепловых полей в слоистых средах, состоящих из материалов с различными теплофизическими характеристиками, заключается в необходимости решения соответствующих дифференциальных уравнений в областях, на границах которых температурные градиенты испытывают разрыв. На каждой границе должно выполняться условие равенства тепловых потоков. Первые исследования нестационарной теплопроводности сопряженных тел проведены С.С. Ковнером [6]. Более полно линейная теплопроводность сопряженных тел была рассмотрена М.Г. Коганом [7], который получил аналитическое решение для температурного поля системы, состоящей из произвольного числа слоев, находящихся в абсолютном термическом контакте друг с другом. Также в работе представлен расчет одномерного нестационарного поля многослойной пластины, на внешних поверхностях которой заданы граничные условия третьего рода (решение было получено методом

Фурье с использованием безразмерных комплексов). Менее изучен вопрос теплопроводности двух- и трехмерных многослойных объектов. Этому посвящены работы Е.И. Кима [8], В.А. Кудинова [9]. В работе последнего [9] рассматривается многослойный параллелепипед, на торцах которого заданы граничные условия первого рода, а на одной из граней – третьего рода. Путем совместного применения методов Бубнова-Галеркина и конечных элементов получено решение трехмерной задачи. Здесь же, в качестве примера, рассматривается задача о прогреве плоской слоистой стенки (используется вариационный метод с применением голономного функционала). Однако в вышерассмотренных работах нет решения для многослойных объектов, обладающих кривизной поверхности.

Находить решения задач для любых тел произвольной формы позволяют численные методы, основанные на методе конечных разностей и методе конечных элементов. В более общем случае может быть рассмотрена возможность использования ортогональной криволинейной сетки. Здесь решающее значение (для использования метода) имеет перпендикулярность в точке пересечения касательных к границе и координатной линии, соединяющей узловые точки. В некоторых случаях программу для регулярной сетки можно применить для решения задачи в расчетной области, имеющей нерегулярную геометрию. При этом проводится «блокировка» некоторых объемов регулярной сетки так, чтобы оставшиеся объемы составляли рассматриваемую нерегулярную область, границу которой следует аппроксимировать. Треугольная форма более удобна для аппроксимации нерегулярных областей и получения локального «сгущения» узловых точек сетки метода конечных элементов, который в нашем случае не следует считать отличающимся в принципе от конечно-разностного метода. Возникающие трудности могут быть также успешно преодолены с помощью метода конечных элементов, основанного на интегрировании по контрольному объему. Однако основным недостатком численных методов являются ограниченные возможности для аналитических исследований.

Конструкцию исследуемого объекта представим в виде многослойной цилиндрической оболочки с внутренним радиусом $r_{вн}$, длиной l , материалы слоев которой характеризуются толщиной δ_i ($i=1,2,\dots,N$), коэффициентами теплопроводности λ_i , плотностями ρ_i , удельными теплопроводностями c_i (рис. 2). Вводится цилиндрическая система координат с центром на оси симметрии цилиндра.

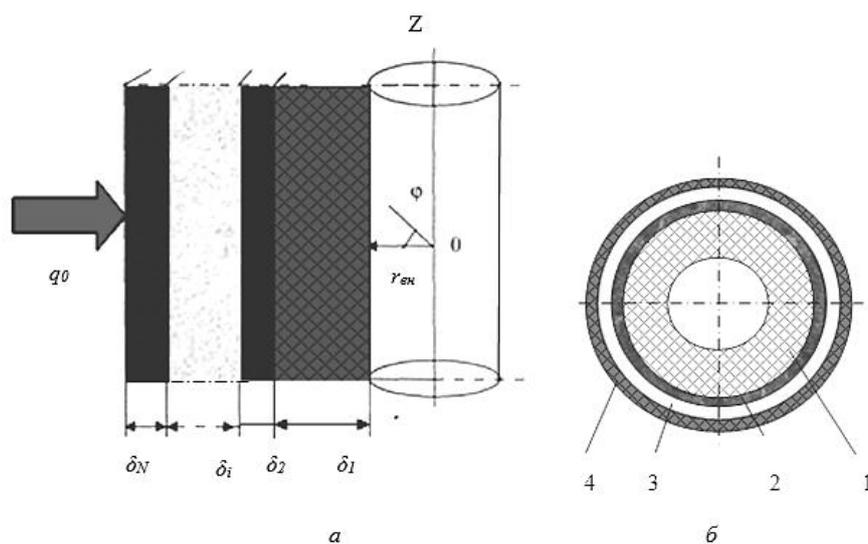


Рисунок 2 – Расчетная схема: *a* – общая схема для разработки математической модели; *б* – четырехслойная конструкция; 1 – ТРТ; 2 – капрон; 3 – резина; 4 – материал типа KEVLAR [Design scheme: *a* – general scheme for developing a mathematical model; *b* – four-layer construction; 1 – solid propellants; 2 – nylon; 3 – rubber; 4 – Kevlar material]

Аналитическое решение задачи приводится в монографии [10]. В качестве исходных данных использовались геометрические параметры и теплофизические характеристики, приведенные в статье [11], состав топлива выбирался из приведенных в работах [12-17]. Например, в монографии [15] указан следующий состав: перхлорат аммония – 46%, циклотетраметилентетранитроамин – 25%, ультрадисперсный порошок алюминия – 20%, полибутадиен с гидроксильными концевыми связями – 8,5% и ферроцен – 0,5%. За температуру воспламенения твердого ракетного топлива (ТРТ) принята 250°C. Некоторые результаты расчетов температурных полей в корпусе гипотетического объекта представлены на рисунке 3.

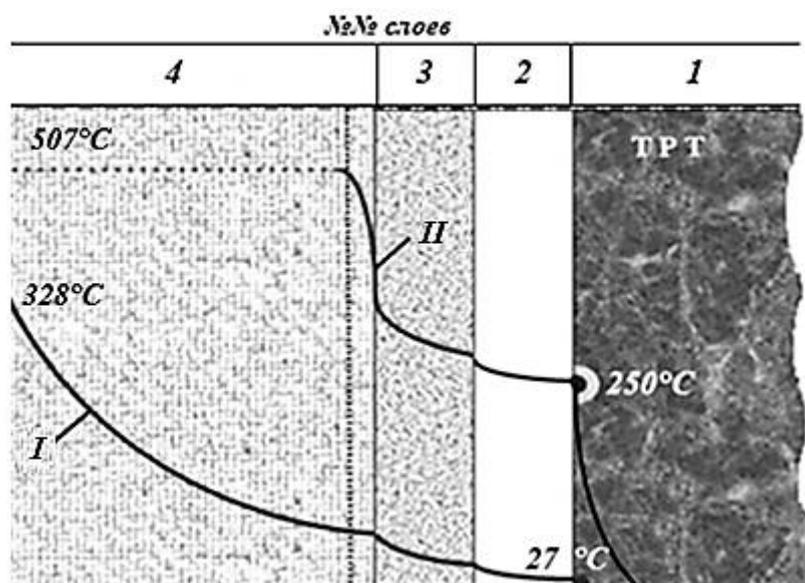


Рисунок 3 – Результаты расчета для $q = 20 \text{ кВт/м}^2$: I – температурное поле в момент начала нагрева ТРТ ($\tau = 125$ секунд); II – температурное поле в момент воспламенения ТРТ ($\tau = 471$ секунда) [The results of the calculation for the $q = 20 \text{ kW/m}^2$: I – temperature field at the moment when solid rocket fuel starts heating ($\tau = 125$ seconds); II – temperature field at the moment when solid rocket fuel ignites ($\tau = 471$ seconds)]

Если объект находится в контейнере, то для определения характеристик теплообмена в пространстве между внутренней стенкой контейнера и внешней поверхностью объекта введем эквивалентный коэффициент теплопроводности воздушной прослойки, формула (1):

$$\lambda_{\text{экс}} = \varepsilon_{\kappa} \lambda_{\delta} + \alpha_1' \delta_{\delta}, \quad (1)$$

где ε_{κ} – коэффициент конвекции;

λ_{δ} – коэффициент теплопроводности воздушной прослойки;

α_1' – приведенный коэффициент теплообмена излучением;

δ_{δ} – толщина воздушной прослойки.

Коэффициент конвекции в горизонтально расположенных концентрических прослойках на каждом временном шаге может рассчитываться по формуле (2):

$$\varepsilon_{\kappa} = 0,105(GrPr)^{0,3}. \quad (2)$$

Тепловой поток от внутренней поверхности контейнера к корпусу объекта определяется из выражения (3):

$$q = \frac{\varepsilon_k \lambda_\delta (\Delta T)}{\delta_\delta}, \quad (3)$$

где ΔT – разность температур внутренней поверхности контейнера и внешней поверхности корпуса объекта; $\alpha_1 = 0$.

При экспериментальных исследованиях моделировались: воздействие открытого пламени в начальной стадии пожара и температурное воздействие горячего воздуха на фрагмент модели цилиндрического корпуса контейнера. Исследуемые образцы представляли собой фрагменты трехслойной конструкции (рис. 4). Основными исследуемыми факторами в рассматриваемом эксперименте являются: температурное поле, время, геометрические размеры модели (толщина слоев) и мощность теплового источника, воздействие которого представлено на рисунке 5.

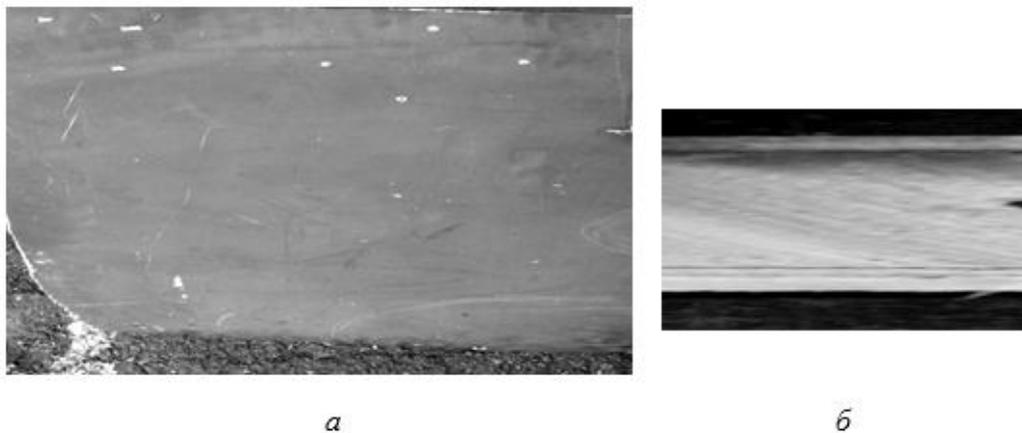


Рисунок 4 – Экспериментальный образец: *a* – внешняя сторона фрагмента; *b* – вид сбоку (три слоя)
[Experimental sample: *a* – the outer side of the fragment; *b* – the side view (three layers)]

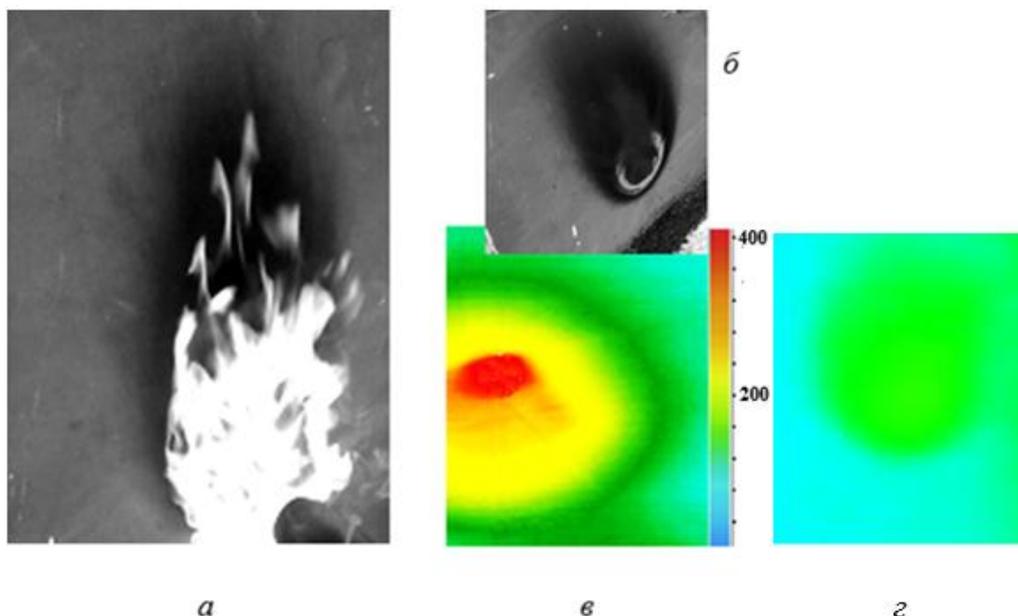


Рисунок 5 – Проведение эксперимента: *a* – воздействие открытого пламени на образец; *b* – образец после воздействия; *c* – изображение внешней поверхности на тепловизоре через 5 секунд после прекращения нагрева; *d* – внутренняя поверхность на тепловизоре через 5 секунд после прекращения нагрева
[Conducting experiments: *a* – exposure to an open flame on the sample; *b* – the sample after exposure; *c* – the image of the external surface on the imager after 5 seconds after stopping heating; *d* – the internal surface on the imager after 5 seconds after stopping heating]

Ниже приведены результаты измерений температур в зоне максимального нагрева на внешней (рис. 6а) и внутренней (рис. 6б) поверхностях одного из образцов. На рисунке 7 представлен один из образцов после нагрева модели корпуса контейнера открытым пламенем. Видно, что в результате воздействия на поверхность образца пламени происходит расслоение внешнего слоя и плавление теплозащитного слоя конструкции.

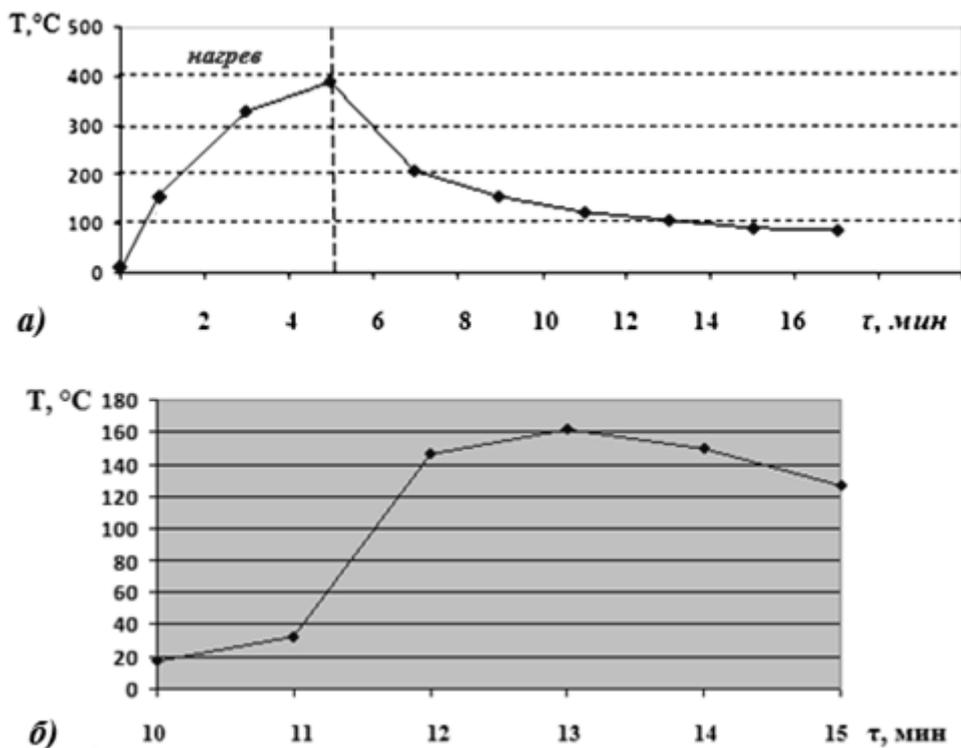


Рисунок 6 – Результаты эксперимента: а – изменение температуры на внешней поверхности образца (время воздействия пламени 330 секунд); б – изменение температуры на внутренней поверхности образца [Experimental result: a – temperature change on the outer surface of the sample (the time of exposure to the flame is 330 seconds), b – temperature Change on the inner surface of the sample]

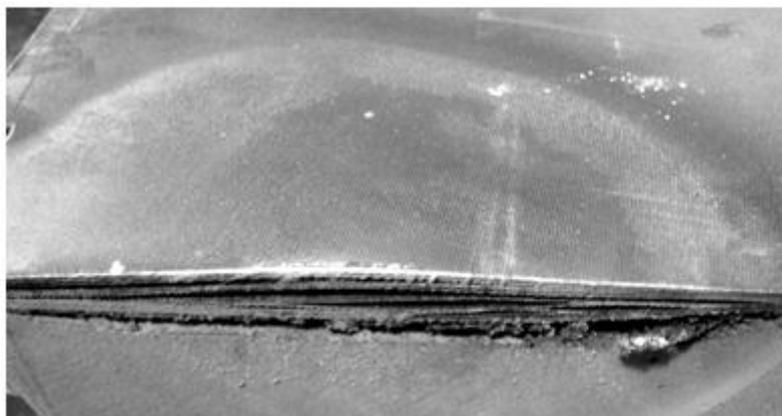


Рисунок 7 – Структура слоев образца после проведения эксперимента [Structure of the sample layers after the experiment]

Также проводились эксперименты по оценке ядерной взрывобезопасности при пожаре. Согласно принятым исходным данным для АС с гипотетическим подвижным агрегатом возгорание топлива, взрывное разрушение корпуса ступени приводят к разбросу фрагментов твердого топлива. Ниже дано описание проведенных экспериментов.

Опыт 1. Моделировался пожар фрагментов топлива, воздействующих на гипотетическую ЯЭУ. Высокотемпературная зона вокруг модели создавалась в течение 80÷90 секунд шашками (15 шт.) топлива близкого по составу, указанному в монографии [15], размеры даны в мм (рис. 8а). В результате полученные значения температур на внутренних элементах модели оказались ниже 110°С.

Опыт 2. Моделировалось температурное воздействие на ЯЭУ газовой струи двигательной установки частично разрушенной ступени ракеты. Направленное воздействие пламени создавалось девятью шашками. Время воздействия 50÷70 секунд. В результате – максимумы температуры на внутренних элементах конструкции модели гипотетической ЯЭУ не превышали 90°С. Фрагменты внешней поверхности (материал на основе стеклопластика) конструкции модели после воздействия представлены на рисунке 8б,в.

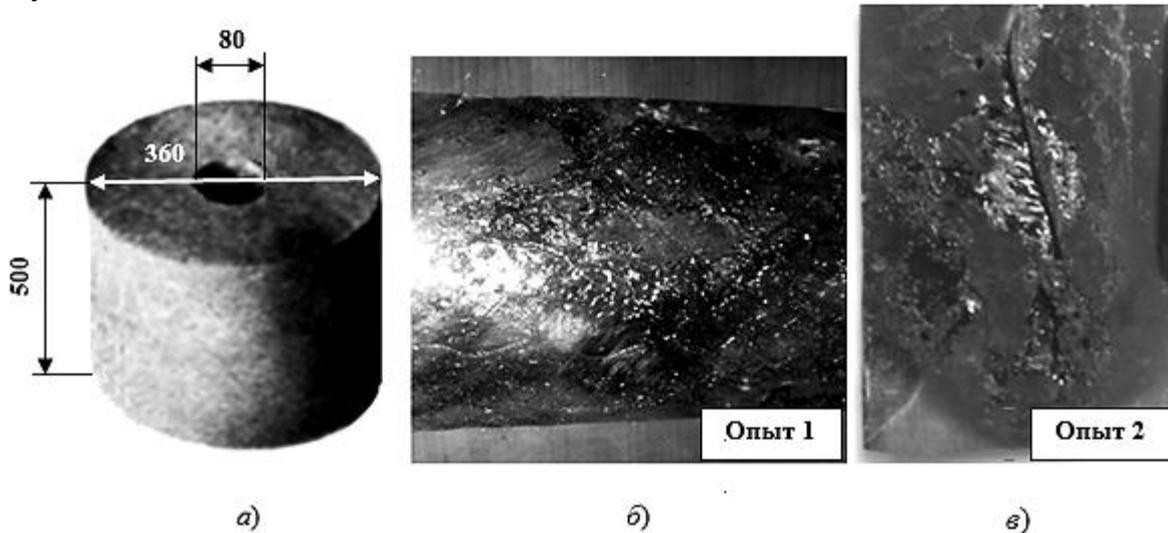


Рисунок 8 – Эксперимент по оценке ядерной взрывобезопасности: а – шашка твердого топлива; б, в – фрагменты конструкции модели после проведения эксперимента [An experiment on the estimation of nuclear explosion: a – solid fuel stick; b, c – fragments of the model structure after the experiment]

Анализ результатов проведенных исследований позволяет сделать следующие выводы:

1. После прекращения пожара нагрев внутренних элементов ЯЭУ продолжается за счет перераспределения тепла при остывании конструкции (вплоть до возгорания и взрыва обычного ВВ в самой ЯЭУ). Причем горение обычного ВВ, находящегося в гермообъеме, может перейти во взрыв. Поэтому работы аварийной команды следует проводить не раньше, чем через 12 часов после окончания пожара.

2. ЯЭУ с обугленным теплозащитным и лакокрасочным покрытием корпуса в зоне размещения заряда опасны в обращении и подлежат обезвреживанию или уничтожению.

3. Взрыв обычного ВВ будет происходить в низкоскоростном режиме (20÷30% от тротилового эквивалента детонации).

4. Температура воспламенения ТРТ объекта в контейнере будет достигнута за время, в разы превышающее время начала горения топлива объекта без контейнера.

5. Необходимо учитывать не только воздействие открытого пламени на конструкцию, но и горячий воздух от пламени, т.к. при продолжительности около 20 мин. и температурах выше 500°С, он будет оказывать значительное влияние на безопасность эксплуатации. Следует учесть, что температура пожара может существенно повысится при сгорании горюче-смазочных материалов подвижного агрегата (до ~ 1000°С).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зайцев, М. С.* Сравнительный анализ военных доктрин Индии и Пакистана / М. С. Зайцев // Сравнительная политика. – 2018. – № 3. – С. 14-25.
2. *Hoodbhoy, P., Mian, Z.* Nuclear battles in South Asia // The Bulletin of the Atomic Scientists. May 4, 2016. URL : <http://thebulletin.org/nuclear-battles-south-asia9415>.
3. *Kristensen, Hans M., Norris, Robert S.* North Korean nuclear capabilities. 2018. Bulletin of the Atomic Scientists. Vol.74. No.1. P. 41-51. URL : <https://www.tandfonline.com/loi/rbul20>.
4. *Губеладзе, О. А.* Экспресс-оценка результатов нерегламентированных деструктивных воздействий на ядерно- и радиационноопасный объект / О. А. Губеладзе, А. Р. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2018. – № 4. – С. 24-30.
5. *Михайлов, В. Н.* Безопасность ядерного оружия России / В. Н. Михайлов. – Москва : Министерство по атомной энергии, 1998. – 148 с.
6. *Ковнер, С. С.* Математическая теория теплового режима n-слойной среды при излучении на границе по закону Ньютона / С. С. Ковнер // Известия АН СССР, Серия «Географическая». – 1937. – №3. – С. 419-430.
7. *Коган, М. Г.* Нестационарная теплопроводность в слоистых средах / М. Г. Коган // Журнал Технической Физики, 1957. – Вып. 82. – № 6. – С. 861-864.
8. *Ким, Е. И.* Об одной задаче теплообмена системы тел / Е. И. Ким // Прикладная механика. – 1957. – Т. 21. – Вып. 5. – С. 624-633.
9. *Кудинов, В. А.* Методы Бубнова-Галеркина и конечных элементов в расчетах трехмерных задач теплопроводности для многослойных конструкций / А. А. Кудинов, В. В. Гнеденко, Б. В. Воробьев // Известия Вузов, Серия «Энергетика». – 1992. – № 5-6. – С. 81-86.
10. *Месхи, Б. Ч.* Пожарная безопасность ядерно- и радиационноопасных объектов / Б. Ч. Месхи, О. В. Денисов, О. А. Губеладзе. – Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2014. – 162 с.
11. *Беляев, Н. Н.* Моделирование процесса возгорания твердого топлива в корпусе ракеты / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, А. И. Губин // Вісник ПДАБА. – 2013. – Вип. 10 (187). – С. 28-35.
12. *Блинов, В. И.* Концепция ликвидации твердотопливных ракет и утилизации смесевых ракетных топлив / В. И. Блинов, В. И. Загарских, М. А. Майоров // Россия и Мир: политические реалии и перспективы : сборник. – Москва, 1995. – № 5. – С. 58-63.
13. *Бурлака, Н. М.* Эколого-гигиеническое сопровождение как путь обеспечения безопасности вывода из эксплуатации и ликвидации боевых ракетных комплексов / Н. М. Бурлака, Д. Ф. Жданов, А. А. Щепачев, А. В. Тарабара // Сборник трудов Российской инженерной академии. Секция «Инженерные проблемы стабильности и конверсии». – Москва, 2004. – Вып. 11. – С. 34-41.
14. *Жарков, А. С.* Состояние, перспективы и проблемы утилизации ракетных топлив / А. С. Жарков, В. И. Марьяш, С. М. Уткин // Проблемные вопросы методологии утилизации смесевых ракетных топлив, отходов и остатков жидких ракетных топлив в элементах ракетно- космической техники : сборник трудов научно-практической конференции. – Бийск : ФНПЦ «Алтай», Российская академия ракетных и артиллерийских наук, 2003. – С. 5-10.
15. Технические и экологические аспекты ликвидации твердотопливных межконтинентальных баллистических ракет : монография / Под общей редакцией М. И. Соколовского, Я. И. Вайсмана. – Пермь : Издательство Пермского государственного технического университета, 2008. – 635 с.
16. *Цуцуран, В. И.* Военно-технический анализ состояния и перспективы развития ракетных топлив / В. И. Цуцуран, Н. В. Петрухин, С. А. Гусев. – Москва : МО РФ, 1999. – 332 с.
17. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь / Под редакцией Б. П. Жукова. – Москва : Янус К, 2000. – 483 с.

REFERENCES

- [1] Zaytsev M.S. Sravnitel'nyi analiz voennykh doktrin Indii i Pakistana [Comparative Analysis of Military Doctrines of India and Pakistan]. Sravnitel'naja politika [Comparative Politics]. 2018. No. 3, P. 14-25 (in Russian).
- [2] Hoodbhoy P., Mian Z. Nuclear battles in South Asia // The Bulletin of the Atomic Scientists. May 4, 2016. URL: <http://thebulletin.org/nuclear-battles-south-asia9415>.
- [3] Kristensen Hans M., Norris Robert S. North Korean Nuclear Capabilities. 2018. Bulletin of the Atomic Scientists. Vol.74. No.1. P. 41-51. URL: <https://www.tandfonline.com/loi/rbul20>.
- [4] Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. Express-otsenka rezul'tatov nereglamentirovannykh destruktivnykh vozdeystviy na yaderno- i radiatsionnoопасnyy 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).

- [5] Mikhaylov V.N. Bezopasnost' yadernogo oruzhiya Rossii [Safety of Nuclear Weapon of Russia]. Moskva: Ministerstvo po atomnoy energii [Moscow: Ministry of Nuclear Energy]. 1998. 148 p. (in Russian).
- [6] Kovner S.S. Matematicheskaya teoriya teplovogo regima n-slojnoj sredy pri izluchenii na granitse po zakonu N'jutona [Mathematical Theory of the Thermal Regime of an N-Layer Medium under Radiation at the Boundary according to Newton's Law]. Izvestija AN SSSR. Serija Geograficheskaja [News of the USSR Academy of Sciences. Geographical Series]. 1937. № 3. P. 419-430 (in Russian).
- [7] Kogan M.G. Nestatsionarnaja teploprovodnost v sloistyh sredah [Non-Stationary Thermal Conductivity in Layered Media]. Gurnal Tehnicheskoy Fiziki [Journal of Technical Physics]. 1957. Issue 82, № 6. P. 861-864 (in Russian).
- [8] Kim E.I. Ob odnoj zadache teploobmena sistemy [On a Problem of Heat Exchange of a System of Bodies]. Prikladnaja mehanika [Applied Mechanics]. 1957. Volume 21. Issue 5. P. 624-633 (in Russian).
- [9] Kudinov V.A., Gnedenko V.V., Vorob'yev B.V. Metody Bubnova-Galerkina i konetchnyh elementov v raschetah trehmernyh zadach teploprovodnosti dlja mnogoslujnyh konstruksij [Bubnov-Galerkin and Finite Element Methods in Calculations of Three-Dimensional Heat Conduction Problems for Multilayer Structures]. Izvestija vuzov. Serija Energetika [Higher Education News. Series Energy]. 1992. № 5-6. P. 81-86.
- [10] Meshi B.Ch., Denisov O.V., Gubeladze A.R. Pogarnaja bezopasnost yaderno- i radiatsionnoopasnyh ob'ektov [Fire Safety of Nuclear and Radiation-Hazardous Facilities]. Rostov-na-Donu: Izdatel'skiy tsentr DGTU [Rostov-on-Don. Don State Technical University Publishing Center]. 2014. 162 p. (in Russian).
- [11] Beljaev N.N., Berlov A.V., Gubin A.I. Modelirovanie protsessa vozgoranija tverdogo topliva v korpuse rakety [Simulation of Solid Fuel Combustion in the Rocket Body]. Visnik PDABA [Bulletin of the Pridneprovskaya State Academy of Construction and Architecture]. 2013. Issue 10(187). P. 28-35 (in Ukraine).
- [12] Blinov V.I., Zagarskikh V.I., Mayorov M.A. Kontseptsija likvidatsii tverdotoplivnyh raket I utilizatsii smesevykh raketnykh topliv [The Concept of Elimination of Solid-Propellant Rockets and Disposal of Composite Rocket Propellants]. Rossiya I mir: politicheskie realii I perspektivy: sbornik [Russia and the World: Political Realities and Prospects: Collector]. Moskva [Moscow]. 1995. № 5. P. 58-63 (in Russian).
- [13] Burlaka N.M. Ekologo-gigienicheskoe soprovogdenie kak put obespechenija bezopasnosti vyvoda iz ekspluatatsii I likvidatsii boevykh raketnykh kompleksov [Environmental and Hygienic Support as a Way to Ensure the Safety of Decommissioning and Elimination of Combat Missile Systems]. Sbornik trudov. Sektsija "Ingenernye problemy stabilnosti I konversii" Rossijskoj ingenernoj akademii [Collection of Works. Section "Engineering Problems of Stability and Conversion" of the Russian Engineering Academy]. Moskva [Moscow]. 2004. Issue 11. P. 34-41 (in Russian).
- [14] Zharkov A.S., Mar'yash V.I., Utkin S.M. Sostoyanie, perspektivy i problemy utilizatsii raketnykh topliv [State, Prospects and Problems of Utilization of Rocket Fuels]. Problemy`e voprosy` metodologii utilizatsii smesevy`x raketny`x topliv, otxodov i ostatkov zhidkix raketny`x topliv v e`lementax raketno-kosmicheskoy texniki: sb. trudov nauchno-prakticheskoy konferencii [Problem Questions of the Methodology of Mixed Rocket Fuel Utilization, Waste and Residues of Liquid Rocket Fuels in the Elements of Rocket and Space Technology: Collection of the scientific-practical conference]. Biysk : FNPTS «Altay», Rossiyskaya akademiya raketnykh i artillerijskikh nauk [Biysk. Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. Federal research and production center «Altai»]. 2003. P. 5-10 (in Russian).
- [15] Sokolovskij M.I., Vajsman Ja.I. Tehnicheskie I ekologicheskie aspekty likvidatsii tverdotoplivnyh megkontinental'nyh ballisticheskikh raket [Technical and Environmental Aspects of Eliminating Solid-Fuel Intercontinental Ballistic Missiles]. Perm. 2008. 635 p. (in Russian).
- [16] Tsutsuran V.I., Petrukhin N.V., Gusev S. A. Voенно-tekhnicheskij analiz sostoyaniya i perspektivy razvitiya raketnykh topliv [Military and Technical Analysis of a State and Prospect of Development of Rocket Fuels]. Moskva: MO RF [Moscow: MO RF]. 1999. 332 p. (in Russian).
- [17] Energeticheskie kondensirovannye sistemy. Kratkiy entsiklopedicheskij slovar' [The Power Condensed Systems. Short Encyclopedic Dictionary]. Moskva: Yanus K. [Moscow. Yanus K.]. 2000. 483 p. (in Russian).

The Investigation of Fire Effects to Structural Elements of a Mobile Unit with a Compact Nuclear Power Plant

O.A. Gubeladze¹, A.R. Gubeladze²

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

¹*ORCID iD: 0000-0001-6018-4989*

WoS Researcher ID: F-6921-2017

e-mail: buba26021966@yandex.ru

²*ORCID iD: 0000-0002-6966-6391*

WoS Researcher ID: F-7215-2017

e-mail: buba26021966@yandex.ru

Abstract – During the first twenty years of the XXI century a number of a different nature armed conflicts have occurred. In some of them states with nuclear-missile take part. The article researches one of the phases of emergency situation growth driven by fire generated conventional weapon on the mobile launch platform with solid-propellant ballistic missile. The simulation of the thermal effect on air frame and transporter-launcher container is performed, the result calculation valuation and experiment are carried out.

Keywords: ballistic missile, launcher, transport and launch container, solid rocket fuel, fire, heat flux, temperature field.

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 551.577.7

КОСМОГЕННЫЙ БЕРИЛЛИЙ-7 В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ

© Е.А. Бураева*, В.С. Малышевский*, В.И. Ратушный**

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

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

Изотоп ^7Be один из немногих радионуклидов, содержание которого в атмосфере не зависит от антропогенных факторов. Следовательно, его можно использовать и как монитор для выявления источников поступления в атмосферу радионуклидов техногенного происхождения, таких как нештатные ситуации на радиационноопасных, химически опасных объектах. В статье приведены результаты мониторинга содержания радиоактивного изотопа ^7Be в приземной атмосфере в Ростовской области за десятилетний период с 2001 по 2011 г., охватывающий вторую половину 23-го и первую половину 24-го солнечных циклов. Полученные данные подтверждают обратную зависимость среднегодовой объемной активности космогенного ^7Be от солнечной активности. Данные наблюдений позволили впервые провести комплексное исследование и выявить корреляционные связи объемной активности космогенного ^7Be с основными метеопараметрами, такими как температура воздуха, скорость ветра, количество осадков, относительная влажность и атмосферное давление.

Ключевые слова: атмосферная радиоактивность, приземный слой воздуха, космогенные радионуклиды, ^7Be , активность, атмосферные аэрозоли.

Поступила в редакцию 14.10.2020

После доработки 02.11.2020

Принята к публикации 06.11.2020

Введение

Исследованию радиоактивности Земной атмосферы придается большое значение как в нашей стране (см., например, обзоры [1, 2] и имеющиеся в них ссылки) так и за рубежом (см., например, одно из ранних исследований [3]). Это обусловлено, главным образом, влиянием климатических и техногенных факторов на содержание и перенос загрязняющих веществ в атмосфере, в том числе радиоактивных изотопов. На сегодняшний день мониторинг содержания радионуклидов в приземном слое атмосферы позволяет сделать вывод о том, что существенный вклад в радиоактивность приземного воздуха дает короткоживущий изотоп ^7Be космогенного происхождения (период полураспада 54,4 дня, в результате электронного захвата обнаруживается по пику гамма излучения продукта распада ^7Li 477,59 кэВ с квантовым выходом 10,42 %). Вариации содержаний ^7Be в воздухе связаны с солнечной активностью и имеют характерный сезонный ход и широтную зависимость [4]. Благодаря быстрому распаду его активность изменяется в растениях в зависимости от синоптических условий. Поэтому ^7Be представляет интерес не только с точки зрения радиоактивного воздействия на биологические системы, а также может являться индикатором скоростей обмена в растениях и, как следствие, показателем накопления природными средами загрязняющих веществ, поступающих из атмосферы [5]. Именно это делает его удобным индикатором для быстрой оценки возможного атмосферного загрязнения и воздушного обмена в окружающей природной среде. Более того, ^7Be один из немногих радионуклидов, содержание которого в атмосфере не зависит от антропогенных факторов. Следовательно, его можно использовать и как монитор для выявления

источников поступления в атмосферу радионуклидов техногенного происхождения. Поэтому изучение механизмов и закономерностей процессов возникновения, переноса и миграции радионуклида ^7Be в объектах экосферы и на границах их раздела весьма актуально и своевременно.

Считается, что основные реакции, приводящие к образованию изотопов бериллия в атмосфере Земли, протекают при взаимодействии частиц ядерно-электромагнитного каскада, вызванного галактическими протонами, с главными составляющими атмосферного воздуха – ядрами азота и кислорода [6, 7]. Это так называемые реакции скалывания $^{14}\text{N}(p,X)^7\text{Be}$, $^{16}\text{O}(p,X)^7\text{Be}$, $^{14}\text{N}(n,X)^7\text{Be}$ и $^{16}\text{O}(n,X)^7\text{Be}$. Другим возможным механизмом образования изотопа бериллия ^7Be в верхних слоях атмосферы могут быть фотоядерные реакции $^{14}\text{N}(\gamma,X)^7\text{Be}$, $^{16}\text{O}(\gamma,X)^7\text{Be}$ и $^{12}\text{C}(\gamma,X)^7\text{Be}$. Так в работах [8, 9] проведены измерения средних значений сечений реакций на элементах N, O и C природного изотопного состава в интервале энергий от порога до 90 МэВ. На основании измеренных сечений фотообразования ^7Be , а также моделирования ядерно-электромагнитного каскада в атмосфере исследован вклад фотоядерного механизма в производство космогенного радиоизотопа ^7Be в земной атмосфере и показано, что вклад фотоядерного механизма сравним с вкладом протонного и нейтронного механизмов образования ^7Be в атмосфере, и его необходимо учитывать при анализе процессов накопления и переноса ^7Be в приземном слое атмосферы.

Почти сразу после образования ядра ^7Be осаждаются на аэрозолях субмикронных размеров, и их дальнейшая судьба определяется процессами переноса с воздушными массами, осаднения и вымывания осадками. Таким образом, в приземный слой воздуха радионуклиды, в том числе и ^7Be , поступают в результате различных процессов: генерации в атмосфере и стратосфере и последующего воздушного переноса (для радионуклидов космогенного происхождения); ветрового подъема пыли с подстилающей поверхности (радионуклиды земного происхождения и искусственные радионуклиды); выбросов предприятий, работающих на углеводородном топливе (главным образом ^{210}Pb), а также в результате прямых поступлений после аварий на предприятиях ядерного топливного цикла (искусственные радионуклиды).

В стратосфере содержится 70-80 % (скорость генерации $0,041 \text{ ат/см}^2\text{с}$), а в тропосфере 20-30 % изотопов ^7Be (скорость генерации $0,027 \text{ ат/см}^2\text{с}$) [6]. Время жизни в стратосфере оценивается в 1,0 – 1,5 года [6, 10] и определяется периодом полураспада ^7Be и обменом воздушных масс между стратосферой и тропосферой. В тропосфере распределение ^7Be по высоте и широте определяется в основном перемещением воздушных масс и вымыванием аэрозолей. Время жизни ^7Be в тропосфере 24-30 сут. [10]. В стратосфере эти процессы существенно менее интенсивны, колебания объемной активности связаны исключительно с вариацией космических лучей и зависят от активности солнца, геомагнитной широты и высоты над уровнем моря.

Из-за наличия между стратосферой и тропосферой слоя мощной температурной инверсии (тропопаузы) ^7Be переносится в осенне-летний период перестройки атмосферы из стратосферы в тропосферу. Кроме того, в самой тропосфере генерируется ^7Be . Скорость генерации ^7Be в атмосфере одна из самых высоких и примерно равна $0,081 \text{ ат/см}^2\text{с}$ (выше только скорость генерации ^3H и ^{14}C). Вариации концентрации ^7Be у земной поверхности зависят от процессов обмена воздушных масс между резервуарами стратосферы и тропосферы, процессов сухих и мокрых выпадений; процессов в тропосфере (вертикальный перенос, адвекция и пр.).

В литературе достаточно много данных по мониторингу содержания ^7Be в земной атмосфере на различных широтах и в различных климатических условиях (см., например, работы [11-14] и содержащиеся в них ссылки). Имеются некоторые общие закономерности. Так, процессы обмена между стратосферой и тропосферой определяют сезонный ход среднемесячных значений объемной активности ^7Be . В

сезонном ходе объемной активности ^7Be , как правило, имеется весенний (летний) максимум и осенний (зимний) минимум.

При изменении солнечной активности (которую принято определять по числу пятен на Солнце или по т.н. числам Вольфа) в пределах 11-ти летнего солнечного цикла и аperiодических вспышках активности Солнца изменяется геомагнитное поле, в нем отклоняются галактические протоны и, соответственно, изменяется скорость образования ^7Be [4]. При этом возрастанию солнечной активности (т.е. увеличению чисел Вольфа) соответствует уменьшение скорости образования ^7Be и наоборот. Из-за влияния геомагнитного поля Земли на распределение частиц ядерно-электромагнитного каскада скорость образования ^7Be зависит и от географических координат станции наблюдения.

На территории России оценка содержания ^7Be в приземном слое воздуха ранее проводилась главным образом для Москвы, Санкт-Петербурга и Ростова-на-Дону [15, 16]. Например, по данным Московского центра ГСЭН среднее значение содержания ^7Be (с 1996 по 2001 гг.) составило $4,3 \text{ мБк/м}^3$ (для сравнения, приводимое в справочниках значение – $3,0 \text{ мБк/м}^3$). Минимальное содержание ^7Be – $1,0 \text{ мБк/м}^3$ зарегистрировано 08.12.2000 г., а максимальное – $12,2 \text{ мБк/м}^3$ 9.06.1999 г., т.е. содержание ^7Be варьирует в пределах порядка. Прослеживается чёткая зависимость между содержанием ^7Be и временем года. Зима, осень – низкие значения, лето, весна – высокие. Это может быть связано с вымыванием зимой и осенью из атмосферы аэрозолей, на которых сорбируется ^7Be .

Для надежного установления связи содержания ^7Be в приземном слое воздуха с солнечной активностью на фоне вариаций факторов иного происхождения необходимы длительные (более 2-х циклов солнечной активности) систематические определения ^7Be на глобальной сети станций. В данной работе приведены результаты изучения содержания космогенного ^7Be в приземном слое атмосферы за период 2001-2011 гг. на примере индустриального города (Ростов-на-Дону) с умеренно-континентальным климатом.

Материалы и методы

Отбор проб атмосферных аэрозолей проводился на Аспирационной станции Южного федерального университета в г. Ростове-на-Дону ($47^\circ 14'$ с.ш и $39^\circ 42'$ в.д) показан на рисунке 1.



Рисунок 1 – Аспирационная станция Южного федерального университета (г. Ростов-на-Дону) [Aspiration station of the Southern Federal University (Rostov-on-Don)]

Фильтровентиляционная установка оснащена электровентилятором мощностью 0,676 кВт и производительностью 600 м³/час, обеспечивающим давление 335 мм.рт.ст. На фильтродержателе (цилиндр из металлической сетки) устанавливается фильтр из ткани Петрянова ФПП-15-1.7 общей площадью 0.56 м³ (в том числе торцевой части площадью 0.028 м³). Воздух через заборный патрубок поступает в герметичную камеру с фильтром и через воздухоотводящий патрубок и электровентилятор выбрасывается в атмосферу. Контроль расхода воздуха проводится сразу после установки и перед снятием фильтра с помощью измерительной диафрагмы с определением разницы статических давлений в воздуховоде до и после диафрагмы (расположенной в сечении воздуховода) микроманометром ММН-240.

По результатам измерений расход воздуха составляет около 630 м³/час в начале экспозиции («свежий» фильтр) и около 510 м³/час в конце 7-дневной экспозиции (аэрозоли экспонированного фильтра создают дополнительное сопротивление потоку воздуха). Для определения чистого времени экспозиции использовали электронный хронометр.

Экспонированный фильтр просушивали на воздухе и запрессовывается в таблетки диаметром 35 мм и высотой 10 – 30 мм. Через 14 суток после снятия фильтра его гамма-спектр измеряется в течении 24 часов. Содержание ⁷Ве в атмосферных аэрозолях определяли гамма-спектрометрическим методом радионуклидного анализа по пику 477,59 кэВ (10,42 %) с использованием низкофоновой камеры с GeHP-детектором и набором аттестованных счетных геометрий. Эффективность детектора составляла 25% в диапазоне 30-1500 кэВ, а отношением пик/комpton 51,7:1 (модель 7229N-7500sl-2520, фирмы Canberra). Погрешность определения объемной активности ⁷Ве не превышала 10%.

Анализ результатов

В результате непрерывных измерений объемной активности ⁷Ве в приземном слое воздуха г. Ростова-на-Дону за период 2001-2011 гг. установлено, что его содержание в атмосферных аэрозолях варьируется в пределах, от 0,025 мБк/м³ до 27,0 мБк/м³, при среднем содержании за все время наблюдений 5,107 мБк/м³. В основном, большинство измеренных значений содержания ⁷Ве попадает в диапазон 3-7 мБк/м³, что соответствует мощности поглощенной эквивалентной дозе примерно 10⁻⁸ мЗв/год.

Исследования радиоактивности приземной атмосферы г. Ростова-на-Дону охватывают вторую половину 23-го (2001-2007 гг.) и первую половину 24-го (2007-2011 гг.) солнечных циклов. Полученные данные (рис. 2) подтверждают обратную зависимость среднегодовой объемной активности ⁷Ве от солнечной активности. На максимум чисел Вольфа (111,0) приходится минимум содержания ⁷Ве (3,2 мБк/м³).

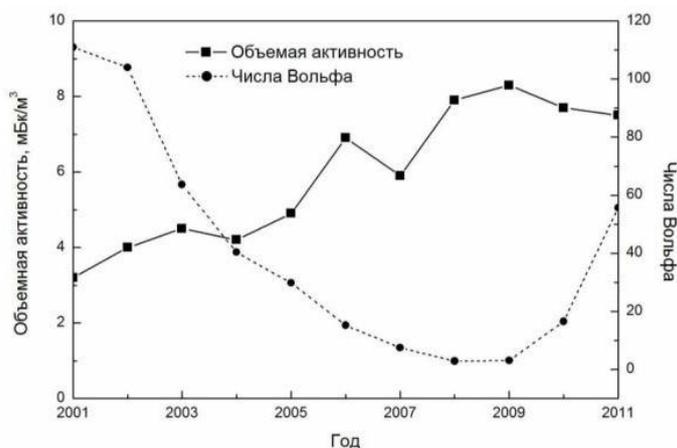


Рисунок 2 – Среднегодовые значения объемной активности ⁷Ве в приземной атмосфере и чисел Вольфа за период наблюдения с 2001 по 2011 гг. [Average annual values of the volumetric activity of ⁷Be in the surface atmosphere and Wolf numbers for the observation period from 2001 to 2011]

Детальное (среднемесячное) поведение объемной активности ^7Be и чисел Вольфа также демонстрируют их обратную зависимость (рис. 3а). Соответствующая диаграмма рассеяния приведена на рисунке 3б. Вычисленный коэффициент корреляции составляет величину $k = -0,42$. При этом явные солнечные вспышки (например, событие 29 октября 2003 г.) не сказываются на годовом поведении ^7Be в атмосфере, что, по-видимому, связано с дополнительным совокупным влиянием метеопараметров и времени года на сезонное распределение данного радионуклида.

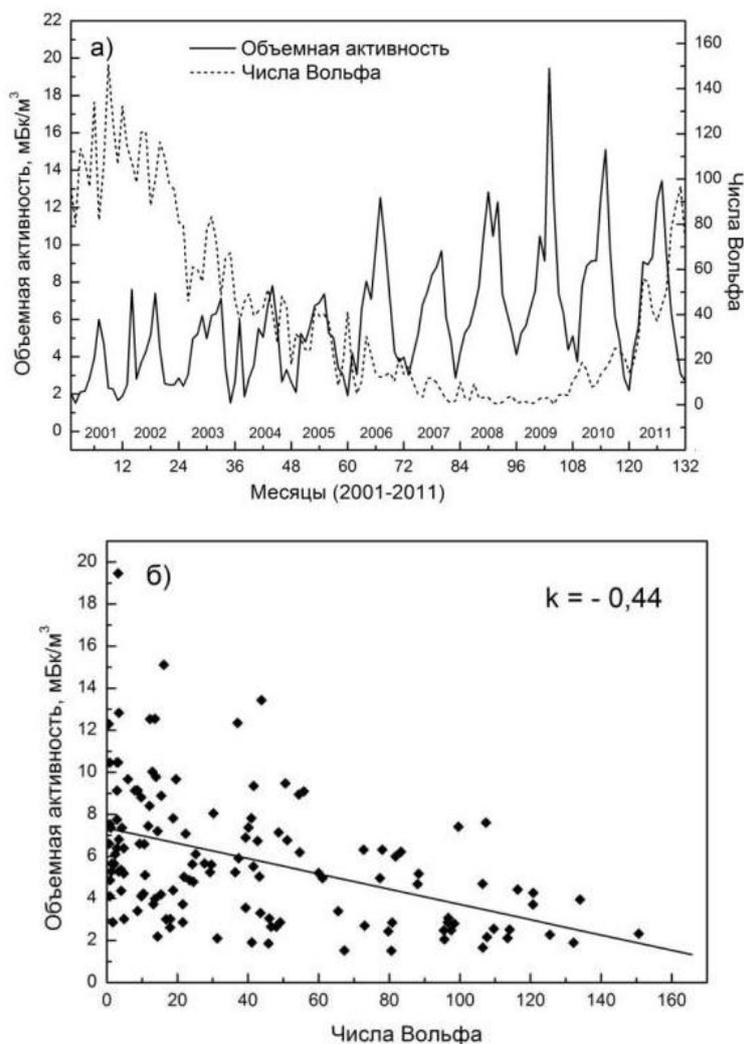


Рисунок 3 – а) Среднемесячные значения объемной активности ^7Be в приземной атмосфере и чисел Вольфа за период наблюдения с 2001 по 2011 гг.; б) Диаграмма рассеяния, иллюстрирующая корреляционную связь среднемесячных значений объемной активности и чисел Вольфа за период наблюдений с 2001 по 2011 гг. [а) Monthly mean values of the volumetric activity of ^7Be in the surface atmosphere and Wolf numbers for the observation period from 2001 to 2011; б) Scatter diagram illustrating the correlation between the monthly mean values of volumetric activity and Wolf numbers for the observation period from 2001 to 2011]

В сезонном ходе объемной активности ^7Be в атмосфере г. Ростова-на-Дону, имеют место максимум в весенне-летний период и минимум – в осенне-зимний. Как уже отмечалось выше, подобное поведение объемной активности ^7Be связано с весенне-летней перестройкой атмосферы и началом вегетационного периода. В сезонном поведении ^7Be (рис. 4), усредненном за период 2001-2011 гг., имеется явно выраженный максимум объемной активности приходящийся на июль. Максимальные среднемесячные значения содержания ^7Be зафиксированы в 2009 г. (июль) – $19,5 \text{ мБк/м}^3$, а минимум в 2001 г. (февраль) – $1,51 \text{ мБк/м}^3$. В целом, в сезонном

поведении ^7Be четкий максимум объемной активности прослеживается с июля по август, как за весь период наблюдений, так и за каждый год (см., например, рис. 3).

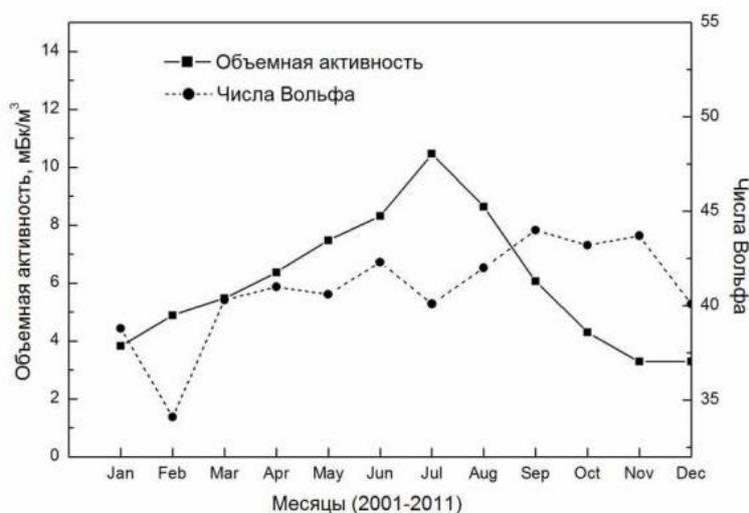


Рисунок 4 – Сезонный ход объемной активности ^7Be в приземной атмосфере и чисел Вольфа, усредненный за период наблюдений с 2001 по 2011 гг. [Seasonal variation of the volumetric activity of ^7Be in the surface atmosphere and Wolf numbers averaged over the observation period from 2001 to 2011]

Полученные данные наблюдений за десять лет впервые позволили провести комплексное исследование связи объемной активности космогенного ^7Be с такими метеопараметрами, как температура воздуха, скорость ветра, количество осадков, относительная влажность и атмосферное давление.

В таблице 1 приведены усредненные метеопараметры для г. Ростова-на-Дону за период наблюдений.

Таблица 1 – Усреднённые метеопараметры [Average meteorological parameters]

Год	Количество осадков, мм	Температура, °C	Скорость ветра, м/с	Относительная влажность, %	Атмосферное давление, мм.рт.ст.
2001	67,0	10,0	1,9	71,7	755,5
2002	46,0	10,3	1,8	69,2	756,0
2003	52,0	9,0	1,9	70,8	756,8
2004	78,0	10,2	1,7	75,1	755,3
2005	58,0	10,8	1,9	71,6	756,2
2006	47,0	10,4	3,1	69,8	755,9
2007	31,0	12,3	4,2	64,8	755,3
2008	36,0	10,8	4,3	69,5	756,3
2009	51,0	10,9	4,4	70,8	755,5
2010	45,0	11,9	5,1	68,8	755,0
2011	48,0	10,1	4,4	69,2	756,1

Максимумы среднегодового количества осадков приходится на 2001 и 2004 гг., самыми засушливыми были 2007 и 2008 годы. Температура воздуха, в целом, изменяется в пределах 10-36 %, максимум среднегодовой температуры воздуха зафиксирован в 2007 году. В целом, в условиях г. Ростова-на-Дону максимум

температуры воздуха и минимум количества осадков и относительной влажности приходится, в основном, на август (реже – на июль). Практически не изменились среднегодовые значения относительной влажности воздуха и атмосферного давления.

За период наблюдений скорость ветра с 2006 г., возросла почти в два раза. Начиная с 2006 г., увеличилась повторяемость ветров восточного и северо-восточного направления. В 2009 г. преобладал ветер восточного направления, далее, при неизменном количестве восточных ветров усиливается повторяемость ветра западного направления. Эти изменения метеопараметров в сочетании (в первую очередь направления и силы ветра, а также относительной влажности воздуха) способствуют ветровому подъему почвенной пыли и поступлению радионуклидов в приземную атмосферу, в то время как количество осадков играет определяющую роль в вымывании аэрозольной пыли. На рисунке 5а,б приведены зависимости объемной активности ^7Be от среднемесячной скорости ветра и соответствующая диаграмма рассеяния, подтверждающие эффективность ветрового подъема. Коэффициент корреляции $k = 0,34$.

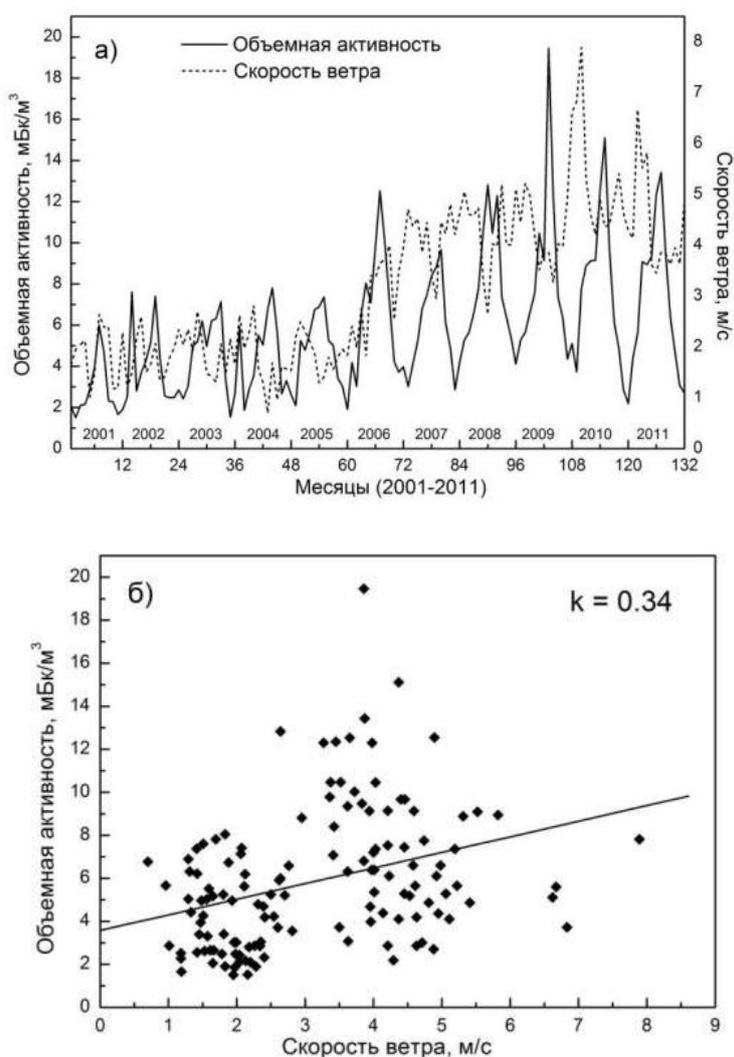


Рисунок 5 – а) Среднемесячные значения объемной активности ^7Be в приземной атмосфере и скорости ветра за период наблюдения с 2001 по 2011 гг.; б) Диаграмма рассеяния, иллюстрирующая корреляционную связь среднемесячных значений объемной активности и скорости ветра за период наблюдений с 2001 по 2011 гг. [а) Monthly mean values of ^7Be volumetric activity in the surface atmosphere and wind speed for the observation period from 2001 to 2011; б) Scatter diagram illustrating the correlation between the monthly mean values of volumetric activity and wind speed for the observation period from 2001 to 2011]

Зависимость ^7Be от количества осадков (рис.6а) более сложная. Для Ростова-на-Дону минимальное количество осадков (0-20 мм) в весенне-летний период приходится, как правило, на май, июль, август и сентябрь. В целом, имеет место обратная зависимость объемной активности ^7Be в приземном слое воздуха от количества выпавших осадков с коэффициентом корреляции $k = -0,21$ (рис. 6б).

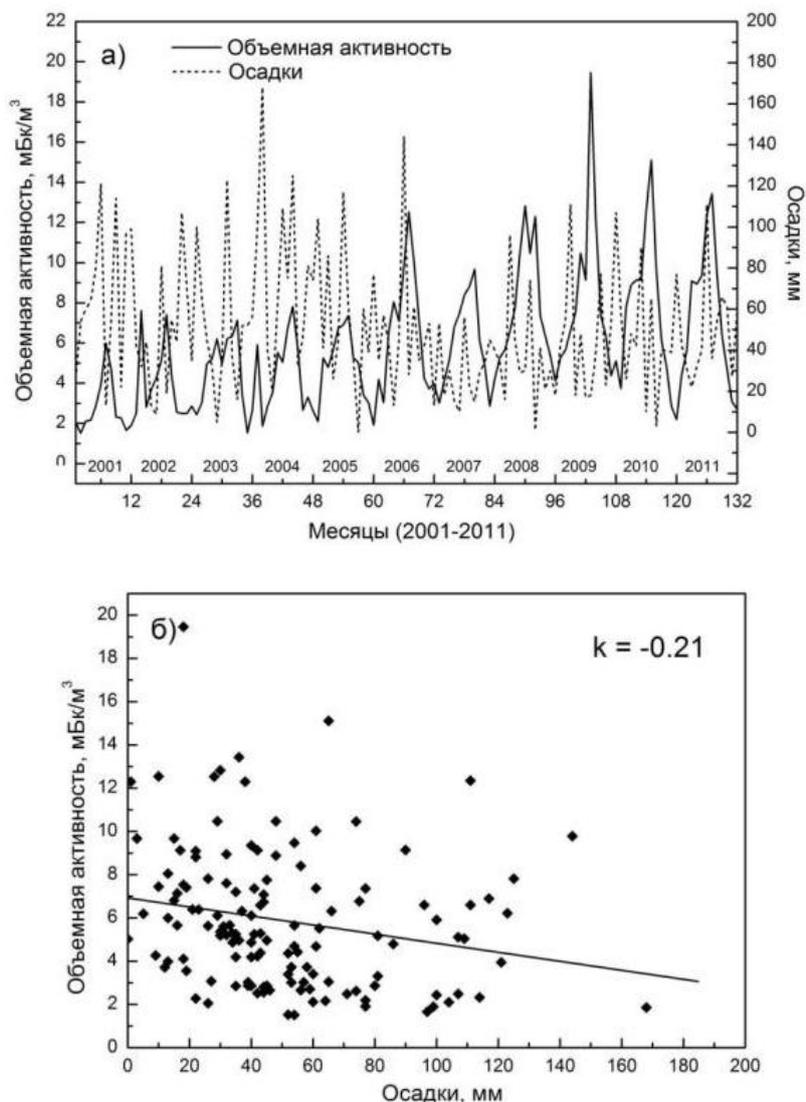


Рисунок 6 – а) Среднемесячные значения объемной активности ^7Be в приземной атмосфере и количества осадков за период наблюдения с 2001 по 2011 гг.; б) Диаграмма рассеяния, иллюстрирующая корреляционную связь среднемесячных значений объемной активности и количества осадков за период наблюдений с 2001 по 2011 гг. [a) The mean monthly values of the ^7Be volumetric activity in the surface atmosphere and the amount of precipitation for the observation period from 2001 to 2011; b) A scatter plot illustrating the correlation between the monthly mean values of volumetric activity and the amount of precipitation for the observation period from 2001 to 2011]

Зависимость объемной активности ^7Be в приземной атмосфере от относительной влажности воздуха также обратная (рис. 7а,б). В основном, на максимумы объемной активности ^7Be в приземном слое воздуха приходятся минимумы относительной влажности воздуха с коэффициентом корреляции $k = -0,62$. В большинстве случаев максимумы объемной активности ^7Be приходятся на период июль-сентябрь с минимальными значениями относительной влажности воздуха (менее 50 %). Подобная зависимость активности ^7Be в атмосферных аэрозолях от количества выпавших осадков и относительной влажности воздуха подтверждает факт вымывания аэрозолей осадками.

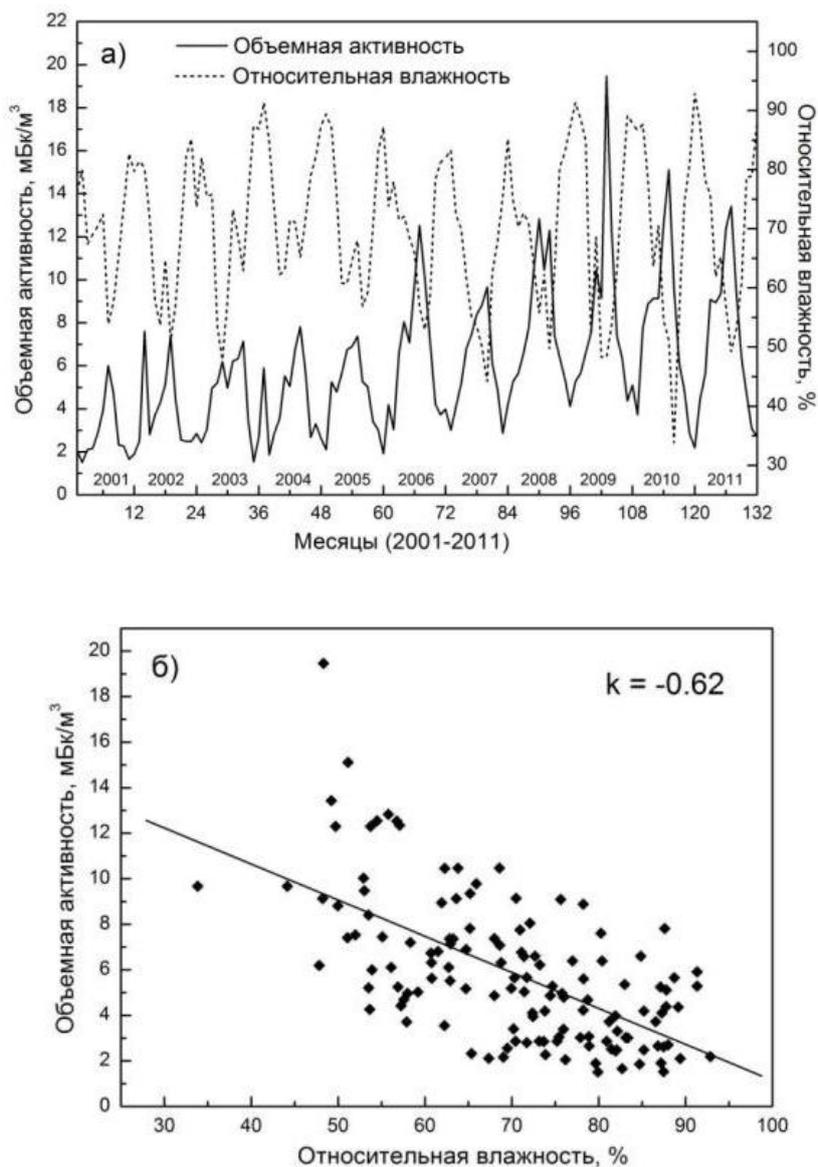


Рисунок 7 – а) Среднемесячные значения объемной активности ${}^7\text{Be}$ в приземной атмосфере и относительной влажности за период наблюдения с 2001 по 2011 гг.; б) Диаграмма рассеяния, иллюстрирующая корреляционную связь среднемесячных значений объемной активности и относительной влажности за период наблюдений с 2001 по 2011 гг. [а) Monthly mean values of the volumetric activity of ${}^7\text{Be}$ in the near-ground atmosphere and relative humidity for the observation period from 2001 to 2011; б) Scatter diagram illustrating the correlation between the monthly mean values of volumetric activity and relative humidity for the observation period from 2001 to 2011]

На рисунках 8а,б и 9а,б приведены зависимости объемной активности ${}^7\text{Be}$ от температуры воздуха и атмосферного давления, соответственно. В целом, сезонный ход ${}^7\text{Be}$ повторяет изменение температуры за период 2001-2011 г. и имеет место прямая зависимость данных параметров с коэффициентом корреляции $k = 0,61$, показанном на диаграмме рассеяния рис 8б. Что касается атмосферного давления, то, как и следовало ожидать, наблюдается обратная зависимость с коэффициентом корреляции $k = -0,54$ (рис. 9б). Такое поведение объясняется тем фактом, что понижение давления обычно сопровождается увеличением осадков и, как следствие, дополнительным вымыванием аэрозолей из приземного слоя атмосферы.

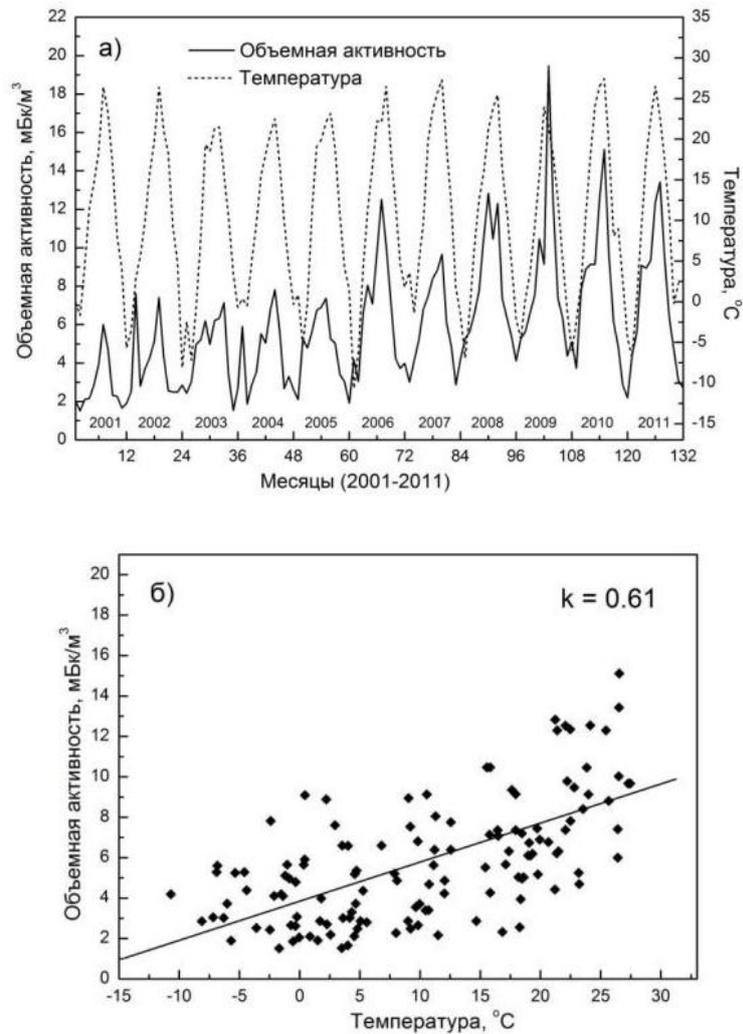
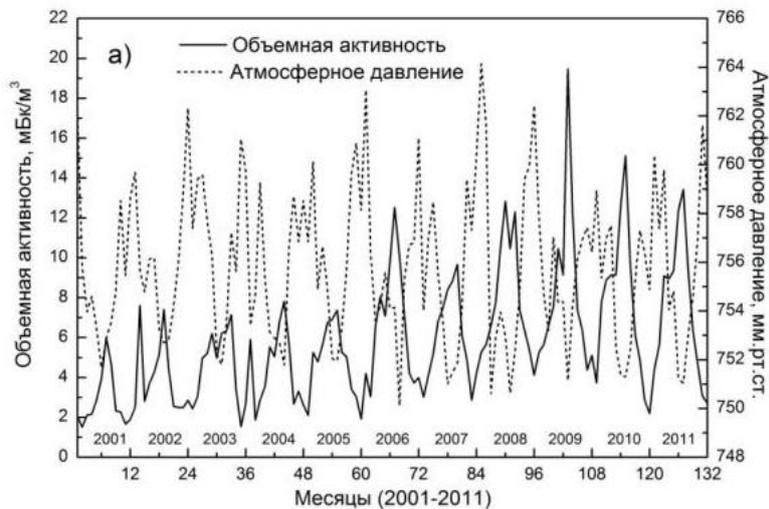


Рисунок 8 – а) Среднемесячные значения объемной активности ^7Be в приземной атмосфере и температуры воздуха за период наблюдения с 2001 по 2011 гг.; б) Диаграмма рассеяния, иллюстрирующая корреляционную связь среднемесячных значений объемной активности и температуры воздуха за период наблюдений с 2001 по 2011 гг. [a) Monthly values of the ^7Be volumetric activity in the surface atmosphere and air temperature for the observation period from 2001 to 2011; b) Scatter diagram illustrating the correlation between the monthly mean values of volumetric activity and air temperature for the observation period from 2001 to 2011]



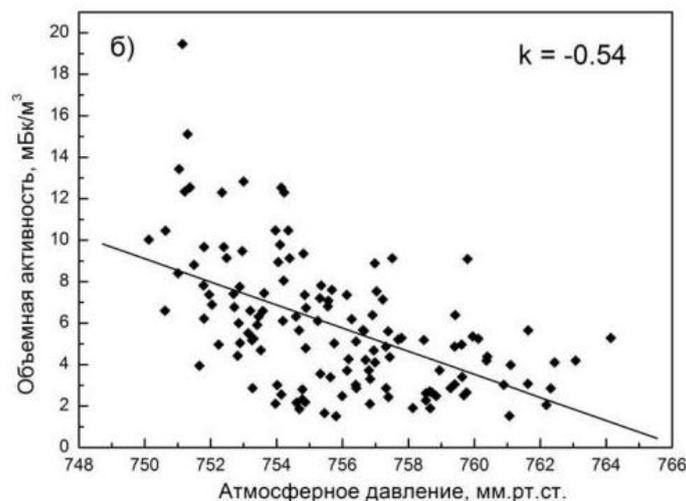


Рисунок 9 – а) Среднемесячные значения объемной активности ^7Be в приземной атмосфере и атмосферного давления за период наблюдения с 2001 по 2011 гг.; б) Диаграмма рассеяния, иллюстрирующая корреляционную связь среднемесячных значений объемной активности и атмосферного давления за период наблюдений с 2001 по 2011 гг. [a) Monthly mean values of ^7Be volumetric activity in the surface atmosphere and atmospheric pressure for the observation period from 2001 to 2011; b) Scatter diagram illustrating the correlation between the monthly mean values of volumetric activity and atmospheric pressure for the observation period from 2001 to 2011]

Выводы

В целом, среди множества радионуклидов, поступающих в приземный слой воздуха в результате различных процессов, только легко определяемый ^7Be практически не связан с деятельностью человека и в минимальной степени зависит от состояния земной поверхности. Поэтому анализ отношений содержания какого-либо из радионуклидов к содержанию ^7Be в приземном слое воздуха может быть использован, во-первых, для выявления источников и оценки особенностей поступления других радионуклидов в атмосферу, а во-вторых, для использования его как трассера вертикального перемещения загрязняющих веществ в приземном слое воздуха.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание в области научной деятельности, Южный федеральный университет, 2020.). Тема № БАЗ0110/20-3-07ИФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимофеева, Ю. М. Российские исследования в области атмосферной радиации в 2003-2006 гг. / Ю. М. Тимофеева, Е. М. Шульгина // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 45. № 2. – С. 193-208.
2. Тимофеева, Ю. М. Российские исследования в области атмосферной радиации в 2007-2010 гг. / Ю. М. Тимофеева, Е. М. Шульгина // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 49, №1. – С. 19-36.
3. Carvalho, Fernando P. Origins and concentrations of ^{222}Rn , ^{210}Pb , ^{210}Bi and ^{210}Po in the surface air at lisbon, portugal, at the atlantic edge of the european continental landmass // Atmospheric Environment. 1995. V. 29, № 15. P. 1809-1819.
4. Terzi, L., Kalinowski, M. World-wide seasonal variation of ^7Be related to large-scale atmospheric circulation dynamics // Journal of Environmental Radioactivity 2017, V. 178-179, P. 1-15.
5. Буряева, Е. А. Содержание космогенного ^7Be в приземном слое воздуха умеренных широт / Е. А. Буряева [и др.] // Атомная энергия. 2007. Т.102, №.6. С. 370-374.
6. Hisao Nagoi, Wataru Tada, Takayuki Kobayashi. Production rates of ^7Be and ^{10}Be in the atmosphere // Nucl. Instr and Methods in Phys. Res. 2001. V. 172B. P.796-801.
7. Usoskin, I. G., Kovaltsov, G. A. Production of cosmogenic ^7Be isotope in the atmosphere: Full 3-D modeling // J. Geophys. Res. 2008. V. 113(D12), P. D12107(1-12).

8. Безуглов, М. В. Фотоядерный канал образования космогенного ^7Be в атмосфере Земли / М. В. Безуглов // Ядерная физика. – 2012. – Т. 75, № 4. – С. 427-431.
9. Bezuglov, M. V. Photonuclear production of cosmogenic beryllium-7 in the terrestrial atmosphere / M. V. Bezuglov, V. S. Malyshevsky, G. V. Fomin, A. V. Torgovkin, B. I. Shramenko, T. V. Malykhina // Physical Review C. 2012. V.86. P.024609(1-12).
10. Koch, D. M., Jacob, D. J., Graustein, W. C. Vertical transport of tropospheric aerosols as indicated by ^7Be and ^{210}Pb in chemical tracer model // J. Geophys. Res. 1996. V.101, P.18651-18661.
11. Gerasopoulos, E. A climatology of ^7Be at four high-altitude stations at the Alps and the Northern Apennines / E. A. Gerasopoulos, P. Stohl, A. Zanis, C.S. Zerefos, C. Papastefanou, W. Ringer, L. Tobler, S. Hubener, H. W. Gaggeler, H. J. Kanter, L. Tositti, S. Sandrini // Atmospheric Environment. 2001. № 35. P. 6347-6360.
12. Azahra, M. Seasonal ^7Be concentrations in near-surface air of Granada (Spain) in the period 1993-2001 / M. Azahra, A. Camacho-Garcia, C. Gonzalez-Gomez, J.J. Lopez-Penalver, T. Bardouni // Applied Radiation and Isotopes. 2003. № 59. P. 159-164.
13. Ioannidou, A. Temporal changes of ^7Be and ^{210}Pb concentrations in surface air at temperate latitudes (40°N) / A. Ioannidou, M. Manolopoulou, C. Papastefanou // Applied Radiation and Isotopes. 2005. № 63. P. 277-284.
14. Kulan, A. Distribution of ^7Be in surface air of Europe / A. Kulan, A. Aldahan, G. Possnert, I. Vintersved // Atmospheric Environment. 2006. №40. P. 3855-3868.
15. Петрова, Т. Б. Содержание бериллия-7 в атмосферном воздухе г. Москвы / Т. Б. Петрова, С. Е. Охрименко, В. К. Власов, П. С. Микляев // АНРИ. – 2007. – № 2. – С. 29-35.
16. Бурева, Е. А. Содержание ^7Be в приземном слое воздуха г. Ростова-на-Дону / Е. А. Бурева, М. Г. Давыдов, Л. В. Зорина, В. С. Малышевский, В. В. Стасов // АНРИ. – 2007. – № 1. – С. 63-67.

REFERENCES

- [1] Timofeeva Yu.M., Shulgina E.M. Rossiyskiye issledovaniya v oblasti atmosfernoj radiatsii v 2003-2006 gg. [Russian Studies in the Field of Atmospheric Radiation in 2003-2006]. Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics of Atmosphere and Ocean]. 2009. T.45. No 2. P.193-208 (in Russian).
- [2] Timofeeva, Yu.M., Shulgina E.M. Rossiyskiye issledovaniya v oblasti atmosfernoj radiatsii v 2007-2010 gg. [Russian Studies in the Field of Atmospheric Radiation in 2007-2010]. Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics of Atmosphere and Ocean]. 2013. T.49. No 1. P.19-36 (in Russian).
- [3] Carvalho Fernando P. Origins and Concentrations of ^{222}Rn , ^{210}Pb , ^{210}Bi and ^{210}Po in the Surface Air at Lisbon, Portugal, at the Atlantic Edge of the European Continental Landmass // Atmospheric Environment. 1995. V.29. № 15. P.1809-1819.
- [4] Terzi L., Kalinowski M. World-Wide Seasonal Variation of ^7Be Related to Large-Scale Atmospheric Circulation Dynamics // Journal of Environmental Radioactivity 2017. V.178-179. P.1-15.
- [5] Buraeva E.A. [et al.] Soderzhaniye kosmogennogo ^7Be v prizemnom sloye vozdukha umerennykh shirot [The Content of Cosmogenic ^7Be in the Surface Layer of the Air of Temperate Latitudes]. Atomnaya energiya [Atomic Energy]. 2007. Vol.102, No 6. P. 370-374 (in Russian).
- [6] Hisao Nagoi, Wataru Tada, Takayuki Kobayashi. Production Rates of ^7Be and ^{10}Be in the Atmosphere // Nucl. Instr and Methods in Phys. Res. 2001. V.172B. P.796-801.
- [7] Usoskin I.G., Kovaltsov G.A. Production of Cosmogenic ^7Be Isotope in the Atmosphere: Full 3-D Modeling // J. Geophys. Res. 2008. V.113(D12). P.D12107(1-12).
- [8] Bezuglov M.V. Fotoyadernyy kanal obrazovaniya kosmogennogo ^7Be v atmosfere Zemli [Photo-Nuclear Channel of Cosmogenic ^7Be Formation in the Earth Atmosphere]. Yadernaya fizika [Nuclear physics]. 2012. T.75. No 4. P.427-431 (in Russian).
- [9] Bezuglov M.V., Malyshevsky V.S., Fomin G.V., Torgovkin A.V., Shramenko B.I., Malykhina T.V. Photonuclear Production of Cosmogenic Beryllium-7 in the Earth Atmosphere// Physical Review C. 2012. V. 86. P024609 (1-12).
- [10] Koch D.M., Jacob D.J., Graustein W.C. Vertical Transport of Tropospheric Aerosols as Indicated by ^7Be and ^{210}Pb in Chemical Tracer Model // J. Geophys. Res. 1996. V.101. P.18651-18661.
- [11] Gerasopoulos E.A., P. Stohl, A. Zanis, C.S. Zerefos, C. Papastefanou, W. Ringer, L. Tobler, S. Hubener, H.W. Gaggeler, H.J. Kanter, L. Tositti, S. Sandrini Climatology of ^7Be at Four High-Altitude Stations at the Alps and the Northern Apennines // Atmospheric Environment. 2001. No 35. P. 6347-6360.

- [12] Azahra M., Camacho-Garcia A., Gonzalez-Gomez C., Lopez-Penalver J.J., Bardouni T. Seasonal ^7Be Concentrations in Near-Surface Air of Granada (Spain) in the Period 1993-2001 // Applied Radiation and Isotopes. 2003. No 59. P. 159-164.
- [13] Ioannidou A., Manolopoulou M., Papastefanou C. Temporal Changes of ^7Be and ^{210}Pb Concentrations in Surface Air at Temperate Latitudes (40°N) // Applied Radiation and Isotopes. 2005. № 63. P. 277-284.
- [14] Kulan, A. Distribution of ^7Be in Surface Air of Europe / A. Kulan, A. Aldahan, G. Possnert, I. Vintersved // Atmospheric Environmen. 2006. № 40. P. 3855-3868.
- [15] Petrova T.B., Okhrimenko S.E., Vlasov V.K., Miklyaev P.S. Soderzhaniye berilliya-7 v atmosfernom vozdukhe g. Moskvyy [The Content of Beryllium-7 in the Atmospheric Air of Moscow]. ANRI. 2007. No 2. P. 29-35 (in Russian).
- [16] Buraeva E.A., Davydov M.G., Zorina L.V., Malyshevsky V.S., Stasov V.V. Soderzhaniye ^7Be v prizemnom sloye vozdukha g. Rostova-na-Donu [Content of ^7Be in the Surface Layer of Air in Rostov-on-Don]. ANRI. 2007. No 1. P. 63-67 (in Russian).

Cosmogenic Beryllium-7 in the Earth Atmosphere

E.A. Buraeva ^{*1}, V.S. Malyshevsky ^{**2}, V.I. Ratushny ^{**3}

^{*}*Southern Federal University, Sorge st., 5, Rostov-on-Don, Russia 344090*

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

¹*ORCID: 0000-0002-8474-3746*

WoS ResearcherID:

e-mail: buraeva@sfedu.ru

²*ORCID: 0000-0003-4538-5496*

e-mail: vsmalyshtvsky@sfedu.ru

³*ORCID: 0000-0002-5701-6279*

e-mail: viratush@mail.ru

Abstract – ^7Be isotope is one of the few radionuclides, the content of which in the atmosphere does not depend on anthropogenic factors. Consequently, it can also be used as a monitor to identify sources of technogenic radionuclides entering the atmosphere such as emergency situations at radiation hazardous, chemically hazardous facilities. The article presents the results of monitoring the content of the ^7Be radioactive isotope in the surface atmosphere in the Rostov region for a ten-year period from 2001 to 2011, covering the second half of the 23rd and the first half of the 24th solar cycles. The data obtained confirm the inverse dependence of the average annual volumetric activity of ^7Be cosmogenic on solar activity. The observational data allowed for the first time to carry out a comprehensive study and to reveal correlations between the volumetric activity of ^7Be cosmogenic with the main meteorological parameters such as: air temperature, wind speed, precipitation, relative humidity and atmospheric pressure.

Keywords: atmospheric radioactivity, surface air layer, cosmogenic radionuclides, ^7Be , activity, atmospheric aerosols.

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 574.52; 631.9; 639.2

**АНАЛИЗ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПОСТУПЛЕНИЯ
ИОНОВ МЕДИ В ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОДОЕМЫ ОТ АТОМНЫХ
СТАНЦИЙ**

© 2020 О.И. Горская*, И.А. Бубликова**, В.М. Сапельников**

*Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция», Волгодонск,
Ростовская обл., Россия

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

Техногенное загрязнение объектов окружающей среды определяет актуальность работы по анализу обеспечения требований экологической безопасности при эксплуатации атомных станций при поступлении ионов меди в водные объекты со сбросами АЭС. В работе выполнен анализ динамики как фактических сбросов ионов меди для Балаковской АЭС, Нововоронежской АЭС и Смоленской АЭС (т/г), так и в долях от нормативно-допустимых сбросов для этого тяжелого металла (%). Показано отсутствие нарушений требований экологической безопасности. Более подробный анализ выполнен для Ростовской АЭС. Показано, что модернизация трубных систем конденсатора турбины энергоблока № 1 привела к резкому снижению поступления ионов меди в водоем-охладитель от атомной станции. Анализ динамики содержания токсиканта в воде водоема-охладителя и Цимлянском водохранилище не выявил влияние поступления ионов меди из водоема-охладителя с фильтрующейся водой на их концентрацию в воде водохранилища.

Ключевые слова: атомная станция, сбросы, содержание ионов меди в воде, водоем-охладитель, Цимлянское водохранилище, поллютант, корреляционно-регрессионный анализ.

Поступила в редакцию 02.10.2020

После доработки 19.10.2020

Принята к печати 28.10.2020

Медь в настоящее время являются одним из ведущих поллютантов водных объектов, при этом этот тяжелый металл относится к биогенным веществам, поступление которых в организмы обязательно в очень маленьких дозах. К сожалению, техногенное поступление данного загрязнителя в объекты природной среды достаточно часто приводит к превышению безопасных концентраций, что с учетом накопительной функции биоты провоцирует рост его содержания в тканях и токсическое поражение организмов. В воде водоемов медь присутствует в форме ионов и может вступать в обменные процессы, как между биотическими, так и абиотическими компонентами водных экосистем. Это определяет внимание специалистов и общественности к присутствию ионов меди в водных объектах [1].

Объекты атомной энергетики всегда рассматриваются как источники поступления в окружающую среду не только радиационных, но и химических загрязнений. В рамках данной работы объектом анализа экологической безопасности АЭС рассматривалось поступление ионов меди со сбросами атомных станций в открытую гидрографическую среду. Для этого была использована информация отчетов по экологической безопасности атомных станций за период с 2013 по 2018 гг., представленная на официальном сайте АО «Концерн Росэнергоатом» [2-21]. Необходимо отметить, что не все АЭС включают в состав основных загрязняющих веществ сбросов такой гидрохимический показатель как ионы меди. При этом, если в отчетах Балаковской

АЭС [2, 6, 9, 12, 14] указывается, что определение фактических сбросов вредных химических веществ с фильтрационными водами водохранилища-охладителя Балаковской АЭС выполняется на основании расчета по гидрохимическим данным в контрольных точках р. Волга выше и ниже водоема-охладителя, то в отчетах Ростовской АЭС [4, 5, 10, 13, 16] данные о поступлении в водные объекты основных загрязняющих веществ приводятся отдельно по каждому выпуску, через которые сбросы АЭС поступают как в водоем-охладитель, так и непосредственно в Цимлянское водохранилище. Поэтому для анализа были использованы однородные данные по трем АЭС – Балаковской, Смоленской, Нововоронежской, который показал, что несмотря на то, что значения фактического сброса ионов меди Нововоронежской АЭС были значительно выше аналогичных значений Смоленской и Балаковской атомных станций, доля рассматриваемого параметра от уровня нормативно-допустимого сброса (НДС) для Нововоронежской и Балаковской АЭС в рассматриваемый период была ниже 40% с тенденцией к снижению (рис. 1, 2), а для Смоленской АЭС при снижении фактического сброса в 2017-2019 гг. относительно 2015 и 2016 гг., доля от НДС наоборот выросла за счет снижения нормативного значения и в 2018-2019 гг. составила 100 %. Но в целом, анализ данных показал, что превышений НДС по рассматриваемому показателю в рассмотренный период не наблюдалось, поэтому экологическая безопасность водных объектов поступлением ионов меди от атомных станций не нарушалась.

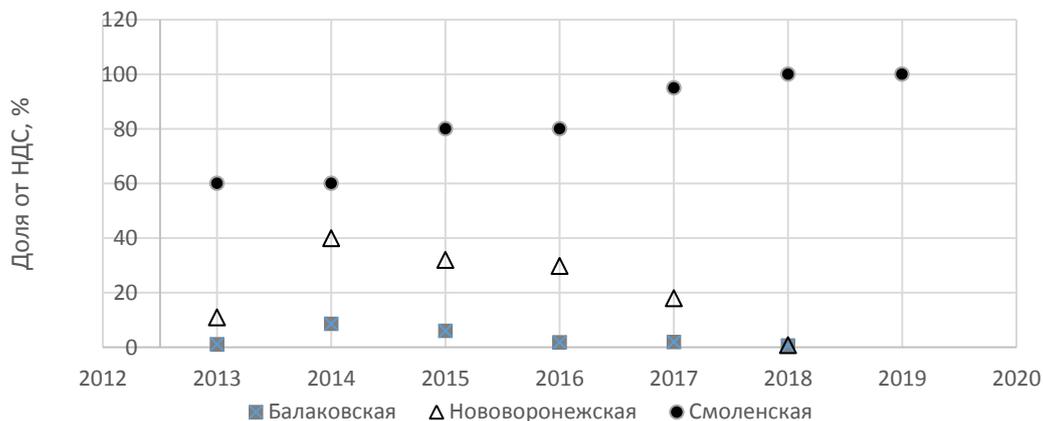


Рисунок 1 – Доля фактических сбросов ионов меди от уровня нормативно-допустимых сбросов (НДС) [The share of actual discharges of copper ions from the level of regulatory permissible discharges (VAT)]



Рисунок 2 – Динамика фактических сбросов ионов меди [Dynamics of copper ions actual discharge]

Рассмотрим более подробно влияние Ростовской АЭС на содержание ионов меди в воде Цимлянского водохранилища, на берегу которого располагается эта атомная

станция, и которое имеет большое рыбохозяйственное и водохозяйственное значение в регионе.

Сбросы от Ростовской АЭС в открытую гидрографическую среду осуществляются через:

- выпуск № 1 – сброс загрязняющих веществ со сточными водами, прошедших биологическую очистку и доочистку на блоке доочистки на очистных сооружениях канализации зоны «свободного» режима в водоём-охладитель;

- выпуск № 2 – сброс продувочных вод водоёма-охладителя в Цимлянское водохранилище, осуществляется с 2010 года;

- выпуски №№ 3 и 5 – сброс очищенных дождевых сточных вод с территории энергоблоков в водоём-охладитель;

- выпуск № 6 – сброс очищенных дождевых сточных вод с территории НДВ х. Харсеев в Цимлянское водохранилище.

Анализ динамики поступления ионов меди через выпуски №№ 1 и 2, представленной на рисунках 3 и 4, показал, что несмотря на то, что НДС не превышен для рассматриваемых выпусков, фактическое поступление поллютанта из водоема-охладителя (ВО) в Цимлянское водохранилище (ЦВ) через выпуск № 2 значительно превышает аналогичные значения выпуска № 1 при использовании выпуска № 2 всего около 2 месяцев в году при продувке ВО на период сброса паводковых вод.

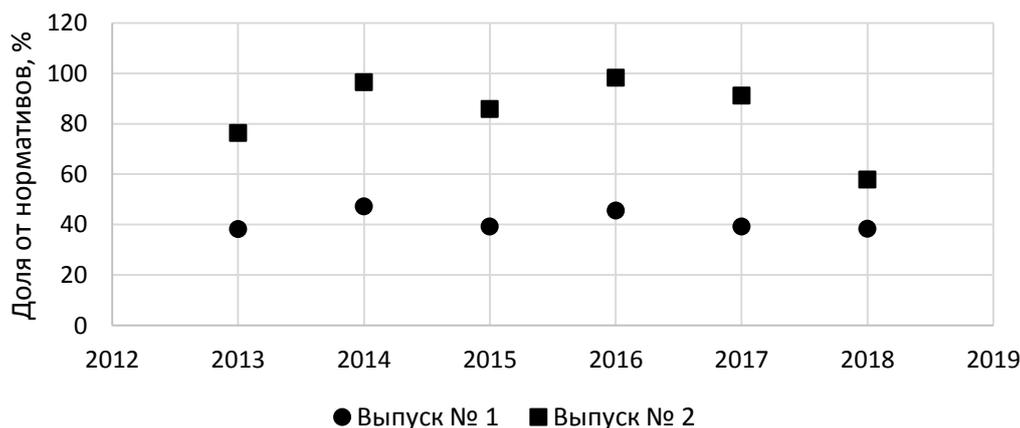


Рисунок 3 – Доля фактических сбросов ионов меди Ростовской АЭС от уровня нормативно-допустимых сбросов (НДС) [The share of Rostov NPP copper ions actual discharges from the level of regulatory permissible discharges (VAT)]

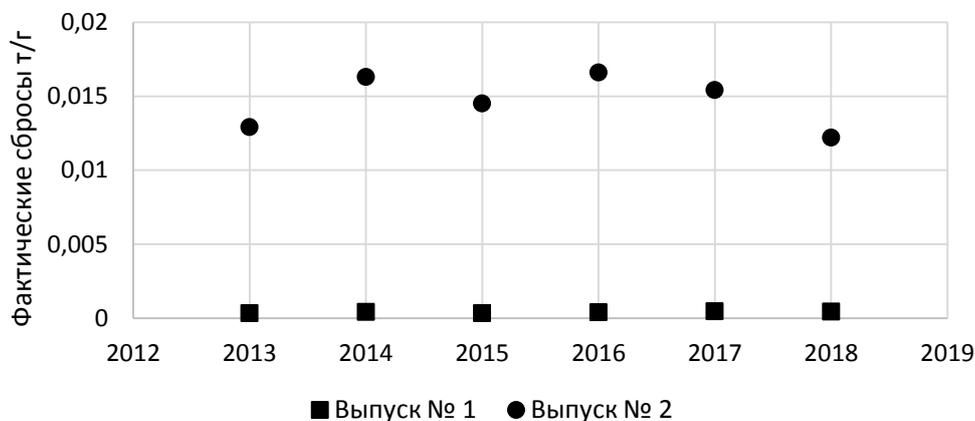


Рисунок 4 – Динамики поступления ионов меди в во и ЦВ через выпуски №№ 1 и 2 Ростовской АЭС [Dynamics of copper ions intake in the cooling reservoir and the Tsimlyansk reservoir through No. 1 and 2 outlets of Rostov NPP]

Рассмотрим взаимодействия Цимлянского водохранилища (ЦВ), водоема-охладителя (ВО) и Ростовской АЭС (РоАЭС) между собой (рис. 5).



Рисунок 5 – Взаимодействие Ростовской АЭС, Цимлянского водохранилища и водоема-охладителя:

1 – подпитка первого контура и других технологических нужд; 2 – забор воды на охлаждение оборудования; 3 – сброс подогретых вод и очищенных сточных вод; 4 – фильтрация воды через тело плотины, продувка ВО; 5 – подпитка ВО [Interaction of the Rostov NPP, the Tsimlyansk reservoir and the cooling reservoir: 1 – recharge of the primary circuit and other technological needs; 2 – water intake for equipment cooling; 3 – discharge of heated water and treated waste water; 4 – filtration of water through the body of the dam, cooling reservoir blowing; 5 – cooling reservoir feeding]

В таблице 1 представлены данные, характеризующие интенсивность водообмена между рассматриваемыми объектами [3]. Таким образом, учитывая представленные выше взаимодействия и интенсивность водообмена, возможно поступление ионов меди с водой от атомной станции в Цимлянское водохранилище за счет фильтрации воды через тело плотины и продувки водоема-охладителя.

Таблица 1 – Характеристики водообмена между Ростовской АЭС, Цимлянским водохранилищем и водоемом-охладителем в 2017 г., тыс. м³ [Characteristics of water exchange between Rostov NPP, Tsimlyansk reservoir and cooling pond in 2017, thousand of m³]

№	Наименование	Фактический объем
1.	Подпитка первого контура и других технологических нужд	4961,21
2	Объем воды в системах оборотного водоснабжения*	4 417 198, 31
4	Фильтрация воды через тело плотины,	13458,36
5	Продувка ВО	8294,40
6	Подпитка ВО	59105,02

* – На Ростовской АЭС две системы оборотного водоснабжения:

- 1) система охлаждения оборудования турбинного отделения (неответственных потребителей) – оборотная вода водоема-охладителя и башенной испарительной градирни;
- 2) система охлаждения оборудования реакторного отделения (ответственных потребителей) – оборотная вода брызгальных бассейнов.

Для оценки Ростовской АЭС как источника поступления ионов меди в водоем-охладитель были использованы результаты ежемесячного определения содержания ионов меди в воде, полученные при проведении производственного контроля гидрохимических показателей рассматриваемых поверхностных водоемов отделом охраны окружающей среды Ростовской АЭС. При этом был выполнен анализ соответствующих данных на выходе отводящего и на входе подводящего каналов в период с 2004 по 2019 гг., что позволяет оценить изменения показателя до и после охлаждения технологического оборудования.

Корреляционно-регрессионный анализ (рис. 6) показал вполне ожидаемую тесную линейную связь между анализируемыми показателями: $y = 1,2112x - 5E-08$ с коэффициентом детерминации – 0,8585. Но при этом выявлено увеличение содержания ионов меди в воде отводящего канала по сравнению с аналогичным показателем подводящего. В связи с чем далее был выполнен анализ динамики разностей показателей.

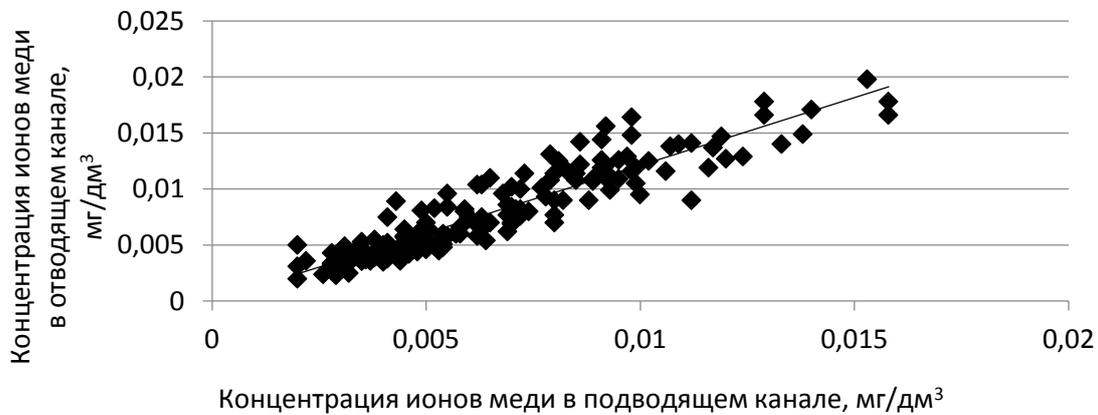


Рисунок 6 – Зависимость содержания ионов меди в воде отводящего канала от их содержания в воде подводящего канала [Dependence of the copper ions content in the outlet channel water on their content in the supply channel water]

Несмотря на то, что рассматриваемые разности в отдельные месяцы были отрицательными, но динамика среднегодовых значений (рис. 7) всегда была положительной. По характеру этой динамики можно выделить три характерных временных промежутка. Первый пришелся на период с 2004 по 2008 гг. с размахом значений практически от нуля в 2004 г. до максимального (0,0006 мг/м³) в 2006 г. Далее следует резкий рост со среднегодовым максимумом в 2011 г. (0,0028 мг/м³). И после модернизации трубных систем конденсатора турбины энергоблока № 1 с заменой медьсодержащих сплавов на титановые в 2015 г. произошло значительное снижение количества ионов меди, вымываемых с теплообменных поверхностей. Это свидетельствует о том, что основной источник поступления токсиканта в воду водоема-охладителя был устранен. Следует отметить, что трубные системы конденсатора турбины энергоблока № 2, который так же использует для охлаждения водоем-охладитель, еще при пуске были выполнены из титановых сплавов.

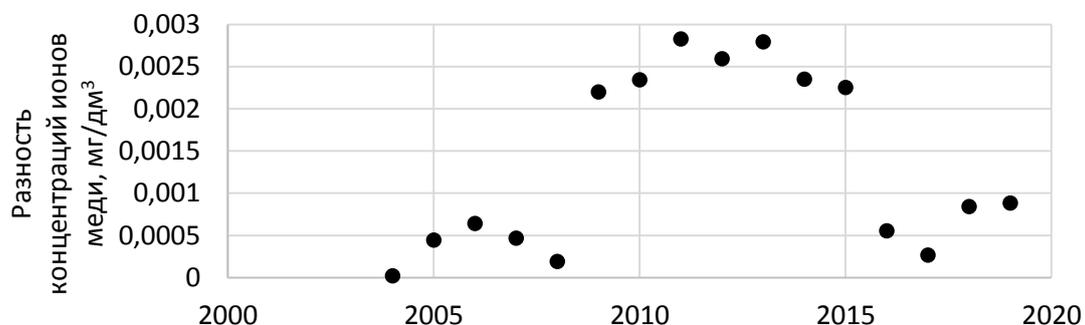


Рисунок 7 – Динамика среднегодовых разностей содержания ионов меди в воде отводящего и подводящего каналов [Dynamics of the average annual differences in the content of copper ions in the water of the outlet and supply channels]

Для анализа значимости для Цимлянского водохранилища поступлений ионов меди от атомной станции в водоем-охладитель были рассмотрены данные по точкам

контроля, находящимся напротив друг друга через фильтрующую плотину, отделяющую водоем-охладитель от Цимлянского водохранилища, в период с 2002 г. по 2019 годы. Для определения зависимости значений рассматриваемого показателя в воде водохранилища от аналогичных значений в воде водоема-охладителя (рис. 8) использовался корреляционно-регрессионный анализ. При этом линейная аппроксимация, выполненная в *MS Excel*, оказалась обратной, то есть большим значениям в ВО соответствовали меньшие значения в ЦВ: $y = -0,177x + 0,0033$, но с учетом значения коэффициента детерминации (0,1974) связь оказалась слабой.

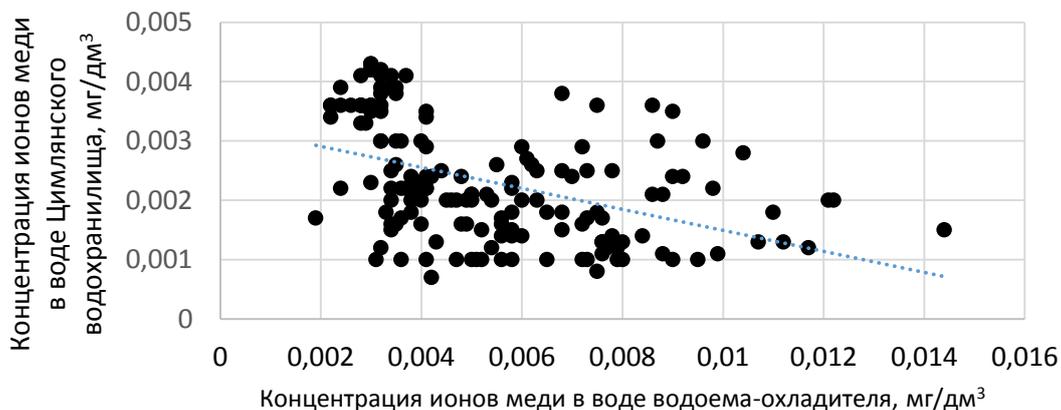


Рисунок 8 – Зависимость содержания ионов меди в воде Цимлянского водохранилища от их содержания в водоеме-охладителе [Dependence of the content of copper ions in the water of the Tsimlyansk reservoir on their content in the cooling pond]

Таким образом, характер динамики содержания рассматриваемого поллютанта в воде водоема-охладителя практически не связан с динамикой аналогичного показателя в воде водохранилища. Очевидно, что соотношение объемов воды в приплотинной части водохранилища и воды, фильтрующейся сквозь плотину из ВО в ЦВ, за счет разбавления нивелирует потенциальный негативный эффект от поступления ионов меди с фильтрующейся водой даже в период наибольшего вымывания ионов меди с поверхности теплообменного оборудования в период 2009-2015 гг., когда среднее значение превышения показателя в воде ВО над аналогичным значением в воде ЦВ составило 0,0019 мг/дм³ с максимумом 0,0036 мг/дм³. Значимость таких превышений определяется нормативом предельно-допустимой концентрации вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения, который для меди составляет 0,001 мг/дм³ [22].

Был проведен сравнительный анализ результатов производственного контроля показателя, выполняемого отделом охраны окружающей среды Ростовской АЭС с данными ежегодников «Экологический вестник Дона» [23]. При этом для сравнения анализируемого параметра в воде Цимлянского водохранилища в районе расположения атомной станции, использовались данные для г. Калач-на-Дону (створ наблюдения реки Дон, впадающей в водохранилище) и г. Волгодонска, как и Ростовская АЭС располагающегося в приплотинной части водохранилища.

Данные, представленные на рисунке 9, свидетельствуют о том, что, несмотря на динамику рассматриваемого показателя в воде водоема-охладителя: рост в 2009-2014 гг., значительное снижение с 2016 г. после модернизации трубной системы конденсатора турбины энергоблока № 1, для рассматриваемых створов наблюдений нет выраженных общих тенденций, а динамика содержания ионов меди в воде створа наблюдения реки Дон (г. Калач-на-Дону) в принципе не может быть связаны с эксплуатацией Ростовской АЭС, располагающейся значительно ниже по течению.

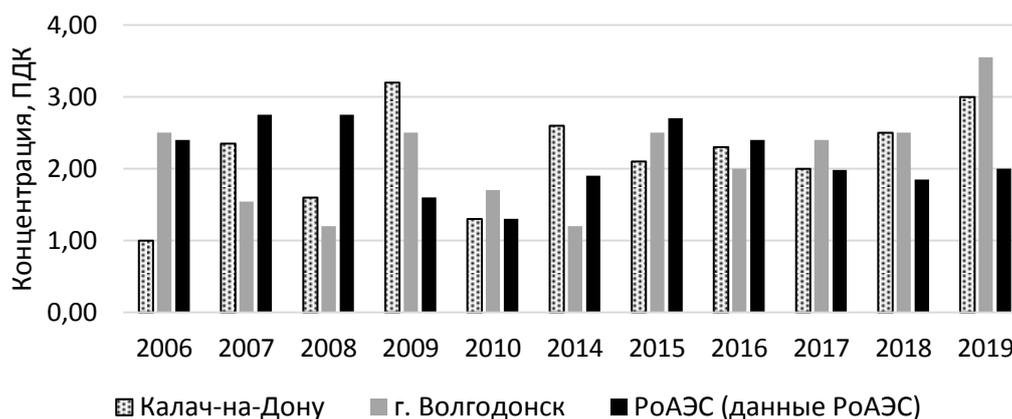


Рисунок 9 – Содержание ионов меди в воде Цимлянского водохранилища, ед. ПДК [Content of copper ions in the Tsimlyansk reservoir water, LOC units]

Выводы

1. Проведенный анализ экологической безопасности поступления ионов меди в поверхностные водоемы от Балаковской АЭС, Нововоронежской АЭС и Смоленской АЭС показал, что превышений нормативно-допустимых сбросов по рассматриваемому показателю в период с 2013 по 2018 гг. не наблюдалось, поэтому экологическая безопасность водных объектов поступлением ионов меди от атомных станций не нарушалась.

2. Более детальный анализ для Ростовской АЭС показал, что несмотря на увеличение количества ионов меди, поступающих в Цимлянское водохранилище из водоема-охладителя в период с 2009 по 2014 гг., благодаря разбавлению в водохранилище фильтрующейся воды, этот процесс не повлиял на сложившийся в водохранилище уровень загрязнения рассматриваемым тяжелым металлом.

3. Необходимо проведение дополнительных исследований по выявлению причин и источников поступления ионов меди в воду р. Дон и Цимлянское водохранилище.

В заключении хотелось бы отметить, что забор воды из Цимлянского водохранилища на технологические нужды Ростовской АЭС, который осуществляется в непосредственной близости от плотины водоема-охладителя, предопределяет заинтересованность атомной станции в поддержании качества этой воды, в том числе за счет минимизации собственного влияния на ее гидрохимические показатели. Поэтому интерес общественности и Ростовской АЭС в стремлении сохранить экологические свойства Цимлянского водохранилища безусловно совпадают.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Турецкая, И. В. Оценка загрязнения тяжелыми металлами поверхностных вод озера в районе полигона / И. В. Турецкая [и др.] // *Фундаментальные исследования*. – 2012. – № 3-3. – С. 539-541. – URL : <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=29750>.
2. Отчет по экологической безопасности. Балаковская АЭС, 2017. – URL : <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/fcc/fccbd124971999bfec951df2dd50c880.pdf>.
3. Отчет по экологической безопасности. Нововоронежская АЭС, 2017. – URL : <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/1b0/1b04fad014abeбec24d67fb9a4a00753.pdf>.
4. Отчет по экологической безопасности за 2017 г., Ростовская АЭС. – URL : <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/35f/35f7e17b9abf95e1ffeb140d7826f1d6.pdf>.
5. Отчет по экологической безопасности за 2016 г., Ростовская АЭС. – URL : <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/034/034a3c3bfc22a08df1e0a3a2d1bbc922.pdf>.
6. Отчет по экологической безопасности за 2016 г. Балаковская АЭС. – URL : <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/32f/32f34a81a395fb935da468e14b6330da.pdf>.
7. Отчет по экологической безопасности. Нововоронежская АЭС, 2016. – URL : <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/1b2/1b2830f224e6b1393afe2d9ace500153.pdf>.

8. Отчет по экологической безопасности за 2015 г., Нововоронежская АЭС – URL : <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/c1a/c1a9cddf7eea78448132932b47c45efc.pdf>.
9. Отчет по экологической безопасности за 2015 г., Балаковская АЭС. – URL : <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/130/130d431b5a375c4e240644ae3f6bd543.pdf>.
10. Отчет по экологической безопасности за 2015 г., Ростовская АЭС. – URL : <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/179/17965cad094d29bb6b698501edd8fd7f.pdf>.
11. Отчет по экологической безопасности за 2014 г., Нововоронежская АЭС. – URL : <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/6b6/6b6eae7d3db0579849a860def016df56.pdf>.
12. Отчет по экологической безопасности за 2014 г., Балаковская АЭС. – URL : <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/1a7/1a7653fd65d183136e275eac114978b0.pdf>.
13. Отчет по экологической безопасности за 2014 г., Ростовская АЭС. – URL : <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/aae/aae24da9ebb12c184ff566087e0d7dbb.pdf>.
14. Отчет по экологической безопасности за 2013 г., Балаковская АЭС. – URL : <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/0f6/0f662120a25d325a35411985a116f083.pdf>.
15. Отчет по экологической безопасности за 2013 г., Нововоронежская АЭС. – URL : <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/73e/73e3d344ea93c70143cсе62a745еес69.pdf>.
16. Отчет по экологической безопасности за 2013 г., Ростовская АЭС. – URL : <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/1ee/1eeb0081b3d5ca00e92eb866017b9e11.pdf>.
17. Отчет по экологической безопасности за 2013г., Смоленская АЭС. – URL : <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/fa1/fa19a336e4bfe74dсc19a5216525af23.pdf>.
18. Отчет по экологической безопасности Смоленской АЭС за 2014 г. – URL : <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/6a7/6a7cb756d40fe10706ab053ae1bef079.pdf>.
19. Отчет по экологической безопасности Смоленской АЭС за 2015 г. – URL : <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/084/08441b8d3d8ed614f8da3a803aeecb82.pdf>.
20. Отчет по экологической безопасности Смоленской АЭС за 2016 г. – URL : <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/33d/33da56170eab28956b28eb5e54cf1833.pdf>.
21. Отчет по экологической безопасности Смоленской АЭС за 2017 г. – URL : <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/4a6/4a66b91389b7c2bb59e042577c938139.pdf>.
22. Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13 декабря 2016 г. N 552 (с изменениями от 12 октября 2018 г., 10 марта 2020 г.). – Система ГАРАНТ. – URL : <http://base.garant.ru/71586774/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/#ixzz6avV7SdG0>.
23. Министерство природных ресурсов и экологии Ростовской области / Экологический вестник Дона. – URL : <https://xn--d1ahaoghbejbc5k.xn--p1ai/projects/19/>.

REFERENCES

- [1] Turetskaya I.V., Potaturkina-Nesterova N.I., Shrol O.Yu., Panteleev S.V., Nemova I.S. Otsenka zagryazneniya tyagely`mi metallami poverhnostny`h vod ozera v ra`one poligona [Assessment of Heavy Metal Pollution of Lake Surface Waters in the Area of the Landfill]. Fundamental`ny`e issledovaniya [Fundamental research]. 2012. № 3-3. P. 539-541 (in Russian).
- [2] Report on Environmental Safety. Balakovo NPP, 2017. URL: <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/fcc/fccbd124971999bfec951df2dd50c880.pdf> (in Russian).
- [3] Report on Environmental Safety. Novovoronezh NPP, 2017. URL: <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/1b0/1b04fad014abe6ec24d67fb9a4a00753.pdf> (in Russian).
- [4] Report on Environmental Safety, 2017, Rostov NPP. URL: <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/35f/35f7e17b9abf95e1ffeb140d7826f1d6.pdf> (in Russian).
- [5] Report on Environmental Safety, 2016, Rostov NPP. URL: <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/034/034a3c3bfc22a08df1e0a3a2d1bbc922.pdf> (in Russian).
- [6] Report on Environmental Safety, 2016. Balakovo NPP. URL: <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/32f/32f34a81a395fb935da468e14b6330da.pdf> (in Russian).
- [7] Report on Environmental Safety. Novovoronezh NPP, 2016 URL: <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/1b2/1b2830f224e6b1393afe2d9ace500153.pdf> (in Russian).
- [8] Report on Environmental Safety, 2015. Novovoronezh NPP URL: <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/c1a/c1a9cddf7eea78448132932b47c45efc.pdf> (in Russian).
- [9] Report on Environmental Safety, 2015, Balakovo NPP. URL: <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/130/130d431b5a375c4e240644ae3f6bd543.pdf> (in Russian).
- [10] Report on Environmental Safety, 2015, Rostov NPP. URL: <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/179/17965cad094d29bb6b698501edd8fd7f.pdf> (in Russian).
- [11] Report on Environmental Safety, 2014, Novovoronezh NPP. URL: <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/6b6/6b6eae7d3db0579849a860def016df56.pdf> (in Russian).
- [12] Report on Environmental Safety, 2014, Balakovo NPP. URL: <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/1a7/1a7653fd65d183136e275eac114978b0.pdf> (in Russian).

- [13] Report on Environmental Safety, 2014, Rostov NPP. URL: <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/aae/aae24da9ebb12c184ff566087e0d7dbb.pdf> (in Russian).
- [14] Report on Environmental Safety, 2013, Balakovo NPP. URL: <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/0f6/0f662120a25d325a35411985a116f083.pdf> (in Russian).
- [15] Report on Environmental Safety, 2013, Novovoronezh NPP. URL: <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/73e/73e3d344ea93c70143cce62a745eec69.pdf> (in Russian).
- [16] Report on Environmental Safety, 2013, Rostov NPP. URL: <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/1ee/1eeb0081b3d5ca00e92eb866017b9e11.pdf> (in Russian).
- [17] Report on Environmental Safety, 2013г, Smolensk NPP. URL: <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/fa1/fa19a336e4bfe74dcc19a5216525af23.pdf> (in Russian).
- [18] Report on Environmental Safety of Smolensk NPP, 2014. URL: <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/6a7/6a7cb756d40fe10706ab053ae1bef079.pdf> (in Russian).
- [19] Report on Environmental Safety of Smolensk NPP, 2015 URL: <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/084/08441b8d3d8ed614f8da3a803aeecb82.pdf> (in Russian).
- [20] Report on Environmental Safety of Smolensk NPP, 2016 URL: <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/33d/33da56170eab28956b28eb5e54cf1833.pdf> (in Russian).
- [21] Report on Environmental Safety of Smolensk NPP, 2017 URL: <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/4a6/4a66b91389b7c2bb59e042577c938139.pdf> (in Russian).
- [22] Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation, December 13, 2016 N 552 (as amended on October 12, 2018, March 10, 2020). – GARANT System. URL : <http://base.garant.ru/71586774/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/#ixzz6avV7SdG0> (in Russian).
- [23] Ministry of Natural Resources and Ecology of the Rostov Region / Ecological Bulletin of the Don. – URL : <https://xn--d1ahaoghbejbc5k.xn--p1ai/projects/19/> (in Russian).

Analysis of the Environmental Safety of Copper Ions Delivery to Surface Water Bodies from Nuclear Plants

O.I. Gorskaya^{*1}, I.A. Bublikova^{2}, V.M. Sapelnikov^{**3}**

**Rostov nuclear power plant, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

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

¹ ORCID iD: 0000-0003-3377-4654

e-mail: gorskaya-oi@vdnpp.rosenergoatom.ru

² ORCID iD: 0000-0002-4857-5271

e-mail: IABublikova@mephi.ru

³ ORCID iD: 0000-0001-5792-5344

e-mail: vsapelnikov@yandex.ru

Abstract – Technogenic pollution of environmental objects determines the relevance of work on the analysis of ensuring environmental safety requirements during the operation of nuclear power plants when copper ions enter water bodies with discharges from nuclear power plants. The paper analyzes the dynamics of both actual discharges of copper ions for Balakovo NPP, Novovoronezh NPP and Smolensk NPP (t / y), and in fractions of the normative permissible discharges for this heavy metal (%). The absence of violations of environmental safety requirements is shown. A more detailed analysis was carried out for the Rostov NPP. It is shown that the modernization of the turbine condenser pipe systems of the power unit No. 1 led to a sharp decrease in the flow of copper ions into the cooling pond from the nuclear power plant. Analysis of the toxicant content dynamics in the water of the cooling reservoir and the Tsimlyansk reservoir did not reveal the effect of the influx of copper ions from the cooling reservoir with filtering water on their concentration in the reservoir water.

Keywords: nuclear power plant, discharges, content of copper ions in water, cooling pond, Tsimlyansk reservoir, pollutant, correlation regression analysis.

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

УДК 551.248.2:551.4.07:551.79:551.782

**К ВОПРОСУ О ГЕОЛОГИИ, ТЕКТОНИКЕ И СТРАТИГРАФИИ
ПЛОЩАДКИ СТРОИТЕЛЬСТВА НОВЫХ БЛОКОВ АЭС БУШЕР В
ИСЛАМСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ ИРАН В СВЕТЕ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ ПОСЛЕДНИХ ЛЕТ**

© 2020 В.Ю. Ульянов

Приднепровская Государственная Академия Строительства и Архитектуры (ПГАСиА), Днепр, Украина

Южный Иран в районе Загроса и границ Аравийской и Евразийской плит является сейсмически активной территорией, на которой находятся крупные промышленные объекты, в т.ч. АЭС «Бушер». В этой связи понятна актуальность изучения современной геодинамики и геологии региона. Геологическое строение территории после проведения инженерных изысканий 1974-2001 гг. уже казалось не вызывающим вопросов. Однако после завершения инженерных изысканий под новые блоки АЭС в 2015 появились новые взгляды на некоторые позиции по сеймотектонике, а позднее, и по геологии района. В статье приведены сведения о геологии, тектонике и стратиграфии района и участка исследований, в т.ч. не освещённые ранее в отечественных отчётных материалах и научных статьях, а также рассмотрены возможные причины появления иных трактовок касаясь сеймотектоники и геологии района расположения площадки АЭС. Представлен краткий анализ результатов исследований, как выполненных ранее, так и завершённых относительно недавно. Рассмотрена дополнительная аргументация в пользу наличия разломных зон в пределах Бушерской антиклинали, предположенных иранскими исследователями. В частности, предположенный ими разлом Харк-Миш может быть частью погребённой древней антиклинальной складки до изменения положения её оси в современный период вследствие неотектонических процессов, обычных для данного региона в целом. Произведено сравнение геологии и тектоники Бушерской антиклинали с аналогичными структурами о. Харк и ближайших островов. Приведены также уточнённые сведения о стратиграфии отдельных геологических формаций района и площадки исследований. Не смотря на аргументированное обоснование различных позиций по геологии и тектонике района, представляется необходимым проведение ряда дополнительных специальных прямых и косвенных исследований, имеющих конечной целью обеспечение безопасности строящихся и действующих блоков АЭС «Бушер».

Ключевые слова: Исламская Республика Иран, АЭС Бушер, Бушерская антиклиналь, тектонические разломы, активные разломы, сейсмичность, геологическая формация, геологическая свита, стратиграфия, палеонтология.

Поступила в редакцию 24.08.2020

После доработки 13.10.2020

Принята к печати 16.10.2020

Введение

Южный Иран в районе Загроса и границ Аравийской и Евразийской плит традиционно является сейсмически активной территорией, на которой находятся крупные промышленные объекты Ирана, в частности, действующая АЭС «Бушер-1» и сооружаемая РФ АЭС «Бушер-2». В этой связи понятна актуальность изучения современной геодинамики, геологии и стратиграфии площадки строительства и региона в целом.

Изыскательские работы на полуострове выполнялись длительное время в несколько этапов в связи с особенностями работы политической и экономической обстановкой в самом Иране.

На первом этапе, в рамках реализации Программы по размещению на территории Ирана атомных энергетических источников, по заказу немецкой фирмы KWU фирмой «Dames & Moore» (США) в 70-е годы прошлого века в провинции Фарс были выполнены предварительные исследования для строительства АЭС «Бушер». По результатам этих исследований на полуострове Бушер были выбраны две площадки (Халиле и Амери). Исследования площадок «Халиле» и «Амери» были начаты в ноябре 1974 года. После выбора площадки «Халиле» для размещения АЭС Иран 1 и 2 исследования на ней продолжались с перерывами до ноября 1975 года и были окончательно завершены осенью 1976 года. В 1978 г. к юго-востоку от комплекса блока Иран-2 той же фирмой по заказу японской фирмы «Mitsubishi Heavy Industries» были проведены геотехнические исследования под проект завода по обессоливанию морской воды. После 1979 г. строительство атомной станции было прекращено. Отдельные виды исследований и наблюдений продолжались до 1984 года.

На втором этапе, после 1996 г., кроме российских (Атомстройэкспорт, Московский Атомэнергопроект, Нижегородский Атомэнергопроект) и иранских специализированных организаций (АЕОИ, «Darya-Khak», «Khak-e-Khoob Consulting Engineers», «Mahab Ghodds» и др.), буровые работы на Бушерском полуострове в этот период также проводила и иранская национальная нефтяная компания. Тектоника района особенно подробно изучалась в ходе проведения сейсмологической экспедиции Института физики земли Российской Академии Наук под руководством д.ф.-м.н. С.С. Арефьева в 1999-2001 гг. Работы были связаны с изучением сейсмической обстановки и непосредственно в районе строительства АЭС Бушер. Геофизические исследования включали работы в субрегиональном масштабе, выполненные как на суше, так и на акватории Персидского залива, и работы на площадке и в ее окрестностях. Основной объем работ был выполнен в 1998-2000 гг. В 2001 г. были выполнены дополнительные инженерные изыскания и исследования на площадках размещения основных сооружений блока 2 АЭС «Бушер».

На третьем этапе, после 2014 г., изыскания на площадке под дополнительные блоки АЭС по заказу Компании по производству и развитию атомной энергии Ирана (Заказчик) также проводили российские организации АО «Атомстройэкспорт» (далее именуемое Подрядчик) и АО «Атомэнергопроект» (АО АЭП). Со стороны Заказчика работы выполнялись компанией ОСЕ («Ofogh Consulting Engineers»). На основании конкурсных процедур, со стороны Подрядчика, к работам по инженерно-геологическим изысканиям традиционно широко привлекались профильные субподрядные организации, имеющие большой опыт проведения работ на площадках АЭС. Ориентировочно, в это же время иранские организации самостоятельно выполняли комплекс работ по сейсмологии района, предложив своё видение его новейшей тектоники, которое в известной степени вступило в некоторое противоречие с результатами всех ранее выполненных исследований российской стороны.

Настоящая статья имеет целью всесторонне проанализировать имеющиеся материалы инженерно-геологических изысканий, выполненных в последние годы. А также рассмотреть в районе проведения исследований некоторые иные сходные по геологическому строению и тектонике структурные элементы данного участка земной поверхности.

Материалы и методы

Геология Бушерского полуострова и площадки АЭС. Геологический разрез площадки под новые блоки АЭС в ходе третьего этапа работ детально изучен до

глубины более 100 м и представлен отложениями неогеновой, неоген-четвертичной и четвертичной систем.

К неогеновой системе относится формация Агаджари (*Aghajari Formation*), датируемая верхним миоценом – нижним плиоценом ($N_1^3-N_2^1$) и являющаяся верхним горизонтом группы Фарс (*Fars*), и представлена пестроцветной толщей переслаивающихся суглинков, глин, песков, глинистых сланцев, мергелей и песчаников. В ее верхах обособляется нижнеплиоценовая часть формации – свита Лахбари (*Lahbari member*), обозначенная на иранских геологических картах как P1 lbm, LBM или $N_{1a.1}$, и имеющая преимущественно песчано-алевритовый состав. Мощность формации на полуострове Бушер составляет 1500 м.

К неоген-четвертичной системе относятся мелководные морские отложения («кэпрок») верхнеплиоцен – нижнечетвертичного ($N_2^3-Q_1$) возраста, которые в виде эродированного панциря «бронируют» нижележащие отложения. «Кэпрок» сложен песчаниками с глинисто-карбонатным цементом и известняками-ракушняками. Образования «кэпрока» можно рассматривать как своеобразную морскую фацию верхнеплиоценовой формации Бахтиари (*Bakhtiari*), обозначенную на иранских геологических картах как P1 bk. Породы трещиноватые, выветрелые, часто разрушены до состояния дресвы и щебня, местами до песка. Мощность кэпрока – 1.6-9.0 м. Отложения кэпрока с небольшим угловым несогласием ($2-3^\circ$, по другим данным $3-4^\circ$) залегают на слоях формации Агаджари.

К современному отделу четвертичной системы (Q_{IV}) относятся эоловые и пролювиальные отложения ($e.pQ_{IV}$), развитые на поверхности участков, не затронутых строительством. Они представлены песками разной крупности, маловлажными со щебнем и дресвой песчаника и известняка. Мощность слоя песков - 0,9-3.0 м. Техногенные (насыпные) отложения (tQ_{IV}) широко распространены на территории площадки и представлены супесями и суглинками с прослоями пылеватого песка, с включениями щебня известняка и песчаника, обломков строительного мусора. Мощность техногенных грунтов составляет 0.3-4.2 м (для сравнения, на площадке 1 блока АЭС она составляет 1-14 м). Типовые геологические разрезы площадки приведены в научной статье списка литературы [1].

Большую часть своей геологической истории рассматриваемая площадь находилась в области интенсивного морского осадконакопления. В плиоцене формация Агаджари (на иранских геологических картах обозначенная как MP1 aj) формировалась в мелководных дельтовых условиях. В конце плиоцена осадконакопление закончилось, предположительно наступил период эрозии, что отчасти подтверждается несогласным контактом «кэпрока» и формации Агаджари (отсутствуют отложения серии N_2^2). С этого периода якобы фиксируется начало формирования Бушерской антиклинали. В ее пределах впоследствии накапливались мелководные морские известняки так называемого «кэпрока».

В тектоническом отношении рассматриваемая площадь расположена на территории Гулхарийского блока, являющегося частью Западного неотектонического макроблока. Поверхность Гулхарийского блока в северо-восточной части представляет собой равнину, представленную суглинками голоценовыми осадками, поверхность которой находится выше уровня моря, на юго-западе плавно переходит в дно Персидского залива. Над поверхностью возвышаются изолированные антиклинали, в ядрах которых обнажаются дочетвертичные отложения. Пока единственной тектонической структурой, определяющей геологические и тектонические условия площадки АЭС «Бушер» и прилегающей к ней десяти километровой зоны, на основании выводов российских исследований 1998-2015 гг., являлась т.н. Бушерская антиклиналь. Видимая часть Бушерского полуострова с расположенной в его южной части площадкой АЭС и очерчивает границы этой антиклинали. По мнению российских исследователей,

имеющиеся данные позволяли считать, что площадка АЭС в настоящее время находится в достаточно устойчивом тектоническом положении [2-4]. В пределах участка до настоящего времени пока не зафиксированы какие-либо поверхностные признаки разломов. Весь этот блок подвержен только слабым флексурным деформациям, которые, очевидно, продолжаются в наши дни. Наблюдаемые тектонические изгибы приповерхностных отложений характеризуются очень малыми градиентами. Средняя максимальная скорость тектонических поднятий за позднплейстоцен-голоценовый отрезок времени составляла до 0.3 мм/год. Сейсмических событий с $M > 4.9$ в пределах антиклинали пока не отмечено, однако на прилегающей территории более сильные сейсмические события довольно часты и постоянны (Казерун-Боразджанская зона разломов). А ряд исследователей (Копничев, Соколова), опираясь на результаты изучения кольцевых структур сейсмичности в данном регионе в 2013-2016 гг., предполагают в нём возможность сейсмических событий с $M > 6.5$, причём в ближайшие годы [5].

Гидрогеологические условия площадки АЭС довольно просты. Региональный поток подземных вод на рассматриваемой территории ориентирован в направлении от центральной наиболее возвышенной части в сторону Персидского залива. Основным источником формирования ресурсов подземных вод являются атмосферные осадки. В связи с техногенным освоением территории ощутимую роль в питании подземных вод приобретают хозяйственные стоки, утечки из водонесущих коммуникаций и поступление воды на поливных участках. В связи с неглубоким залеганием уровней подземных вод значительную роль приобретают испарение и транспирация. Питание водоносных горизонтов в региональном плане происходит исключительно за счет атмосферных осадков. Продолжительные наблюдения за уровнями подземных вод свидетельствуют о влиянии на их режим глобальных климатических циклов. В период засушливых годов происходит повсеместное истощение запасов подземных вод, и региональные уровни снижаются в водораздельных частях на несколько метров, а в прибрежной зоне до 1 м. В периоды нормального инфильтрационного питания наблюдается постепенное восполнение запасов подземных вод, что выражается в постоянном (от года к году) росте уровней воды. В геологическом разрезе на территории расположения площадок АЭС до глубины 50 м российской стороной уверенно выделяется два водоносных горизонта:

- безнапорный водоносный горизонт в верхне-плиоцен-нижнечетвертичных морских отложениях «кэпрока» сезонного действия;
- напорный водоносный комплекс в слоистых песчано-глинистых отложениях верхнего миоцена – нижнего плиоцена формации Агаджари.

Следует отметить, что в отчётных материалах «Dames & Moore», касаемых гидрогеологии площадки 1 и 2 блоков (начатых постройкой фирмой KWU), для характеристики этой толщи, обладающей лишь «слабыми местными напорами», используется термин *very poor*. Естественный режим подземных вод определяется в первую очередь климатическими условиями. Минимальные уровни подземных вод фиксируются в летние периоды, а максимальные в сезон дождей. Годовые амплитуды колебаний уровней разнятся от 10 см до первых метров в зависимости от места расположения скважины. Минимальные амплитуды приурочены к скважинам в береговой зоне, а максимальные наблюдаются на водоразделах.

Учитывая отмеченное отдельными исследователями определённое и весьма близкое сходство геологического строения района п-ва Бушер и о. Харк, в настоящей работе уместно привести некоторые относительно малоизвестные данные о геологическом строении, тектонике и гидрогеологии последнего.

Геологическое строение о. Харк. Остров Харк расположен в северной части Персидского залива ~57 км к северо-западу от Бушера, в 3,7 км к юго-западу от

острова Харк и в 38 км от порта Генаве провинции Бушер. Самая высокая точка острова, называемая горой Дидебан, находится на отметке 87 м над уровнем моря. Геологическое строение острова Харк относительно простое и насчитывает 3 основных геологических слоя. Эти слои включают красноцветные отложения свиты Lahbary (или LBM на местных геологических картах) в верхах формации Агаджари плиоценового возраста (алевролит и цветные мергели), плейстоценовый рифовый известняк и конгломерат свиты Бахтиари (или ВК на местных геологических картах), а также голоценовые прибрежные морские пески [6-9]. Обширная площадь острова Харк покрыта известняком, покрывающий более древние отложения. Геология расположенного в непосредственной близости о. Харк по всей видимости подобна геологии о. Харк, но более точные сведения отсутствуют.

В тектоническом отношении о. Харк – это пологая асимметричная антиклиналь, на которой поверхностные пласты имеют средний уклон от 10 до 15°. Самое последнее орогенное событие (пасаденское), зафиксированное на острове, способствовало появлению и развитию двух выявленных в рельефе антиклиналей более низшего ранга. Обе антиклинали имеют простирание осей к северо-западу. Юго-восточная антиклиналь занимает большую часть острова, тогда как северная антиклиналь присутствует только в северо-восточном углу. Продолжение сближения между Аравийской и иранские плитами привело к деформации молодых отложения на острове Харк и землетрясениям в горах Zagros. Для проведения детальных сейсмических и сейсмологических исследований в районе о. Харк было задействовано научно-исследовательское судно «Профессор Штокман». Это позволило в акватории Персидского залива изучить структуру и физические свойств осадочной толщи под дном залива для обнаружения разломных зон и дислокаций. Для исследования акватории Персидского залива использовалось суперразрешающее сейсмоакустическое профилирование с использованием сейсмопрофилографа типа CHIRP-II (CAP-6600), предназначенное для изучения тонкой структуры верхнего слоя осадков на глубину 20-40 м ниже морского дна с разрешением 10-30 см с целью выявления поверхностных неотектонических нарушений, газонасыщенных осадков и газовых «сипов». В частности, было установлено, что обширные антиклинальные складки внутри слоя донных осадков на ССЗ фланге профиля № 3 в районе о. Харк, вероятно, образовались в результате эпизодической тектонической активности, продолжавшейся примерно до времени 100 тыс. лет назад [10, 11]. Из недавних сейсмических событий в районе островов можно отметить землетрясения, имевшие место 10.08.2020г. с $M=3.6$, а также 18.09.2020г. с $M=3.4$ и $M=3.6$.

Гидрогеологические условия о. Харк также довольно просты. Прибрежные течения создали большую песчаную отмель на восточной стороне острова. Этот процесс продолжается и в настоящее время. Мощность песков по данным бурения составляет до 5 м, что является достаточным для формирования основного водоносного горизонта на острове. Мергели свиты Lahbary мощностью до 20 м, расположенные вдоль антиклинальной оси с направлением север-юг в центре острова, выступают в качестве основы водоносного горизонта. Остров Харк полностью окружен морской водой, и его основной водоносный горизонт ограничен морской водой с востока, юга, севера, а также ограничен рифовыми известняками на западе. Чтобы определить уровень и направление подземных вод, 26 скважин были исследованы на острове Харк в мае 2011 года. Минимальная и максимальные глубины зеркала УГВ были зарегистрированы в 2,51 м и 8,12 м соответственно. Общее направление потока пресных подземных вод в водоносном горизонте острова Харк ориентировано от центра острова к восточному побережью [12-14].

Результаты

В ходе ранее выполненных изысканий на площадке АЭС выявленное угловое несогласие в 2-3°, а по другим данным в 3-4°, между «кэпроком», выделенным по данным изысканий 2015г. на новой площадке в инженерно-геологический элемент (далее по тексту – ИГЭ) 3, а по данным изысканий 1998-2000гг. на площадке 1 блока в ИГЭ-2,2а,2б, и отложениями верхней части свиты Агаджари (выделенным по данным изысканий 2015г. как ИГЭ-5...14) считалось доказанным, как и причины его появления. Однако после анализа результатов изысканий последних лет выявились некоторые особенности геологического строения площадок под новые блоки. В основном это касается отложений, которые были неизвестны на участке 1 и 2 блоков (начатых постройкой фирмой KWU), где они практически отсутствуют. Особенно отчётливо это проявляется в части геологического разреза участков т.н. «ядерных островов» новых блоков, где под слоем «кэпрока» ИГЭ-3 строго ориентированно и очень ограниченно по площади залегают отложения внешне сходных по составу грунтов ИГЭ-6, 7, и, отчасти, ИГЭ-8, разделённые повсеместно развитой т.н. «плащеобразной» толщей суглинков и глин ИГЭ-5 (которые соответствуют грунтам ИГЭ-6 на площадке 1 блока АЭС). Большая часть указанных отложений предположительно выходит за пределы площадки под новые блоки и в целом промплощадки АЭС, о чём будет сказано ниже. Данные отложения, имеющие мощность до 7.3 м и выделенные автором статьи как «пра-кэпрок», представлены следующими грунтовыми разностями, а именно:

- ИГЭ-6 – песчаником желтовато-серым, слабой и средней крепости, на глинисто-карбонатном цементе, кавернозным, трещиноватым;
- ИГЭ-7 – тем же песчаником, но местами разрушенным до состояния щебенисто-дресвяного грунта;
- ИГЭ-8 – этим же песчаником, но с прослоями и линзами пылеватых песков.

Все отложения с включением обломков раковин ракушек. Это обстоятельство, как и особенности разреза в этой части площадки, уже заставляют думать об их различном геологическом возрасте и иных условиях образования отложений «кэпрока» и «пра-кэпрока». Палеонтологический анализ руководящих форм отложений ИГЭ-3 и ИГЭ-6, 7, 8, если он будет проведён, без труда установит разновозрастной характер этих отложений. Всё это позволяет иначе взглянуть на историю геологического развития района, тектонику и стратиграфию его отложений. Граница между «кэпроком» и подстилающими грунтами, ныне трактуемая как угловое несогласие, может являться в т.ч. и плоскостью смещения (типа плоского сдвига) между различными структурами, имеющими разное расположение в толще горных пород. Сама же предполагаемая плоскость смещения могла образоваться вследствие активных тектонических подвижек в районе в поздне-четвертичный период, обычных в этом регионе и зафиксированных у многих антиклинальных складок в данном районе, в частности, по изменению положения главной оси ближайшей к площадке АЭС антиклинальной складки Манд [15-17].

Сами по себе отложения «кэпрока» ИГЭ-3 также достаточно интересны. Многие исследователи относят их к верхнему плиоцену – нижнему плейстоцену. К этому весьма неопределённому временному интервалу предположительно и отнесены эти своеобразные отложения, которые в виде эродированного «панциря» бронирует купол полуострова Бушер. Это мелководные морские отложения, которые на площадке 1 блока АЭС подразделяются на две толщи. Верхняя представляет наиболее жесткую часть «панциря» и состоит из калькаренитов, ракушечников, кальцирудитов и биорудито – рифового комплекса (в том числе рифово-обломочных фаций). Нижняя часть состоит преимущественно из калькаренитов (в мористой половине поднятия) и из кальцилюлитов (в осевой и восточной части поднятия). Общая мощность «кэпрока» изменяется в пределах 2-6 м. В документах «D&M» («Dames & Moore») на

генерализированной колонке Прибрежного Фарси отложения «кэпрока» также были отнесены к формации Бахтиари, венчающей разрез плиоцена. Другие источники выделяют слой «кэпрок» в отдельный слой, т.н. слой Кхарк (*Kharg Limestone*), перекрывающие слои формации Бахтиари и имеющие суть ниже-плейстоценовый возраст.

Как уже указывалось выше, отложения т.н. «пра-кэпрока» ранее почти совершенно не изучались, т.к. были вскрыты только частью скважин на площадке 2 и 3 блоков АЭС в 2015 г. и большей частью выходят за пределы площадки. Данные отложения вполне могут являться своеобразной частью иной, реликтовой структуры в данном районе, также совершенно не изученной. Следует отметить, что при изысканиях «Dames & Moore» в 1974-1975 гг. они были вскрыты совершенно случайно только одной геотехнической скважиной Н-2 на самой границе исследуемой территории промплощадки за б. 2 блоком КWU. И по этой причине также подробно не были исследованы. Большая часть фрагментарно сохранившихся в разрезе новой площадки отложений «пра-кэпрока» вероятно до размыва и эрозии венчала разрез ныне предположительно погребённой под современными наносами антиклинальной складки, первоначальное положение главной оси которой ориентировочно было следующим: площадка АЭС – о. Шиф, до последующего смещения её оси с С на СЗ в поздне-четвертичное время вследствие неотектонических процессов. В настоящее время часть её предположена в низине между Бушерским полуостровом и материковым берегом, периодически затапливаемой водами Персидского Залива. По этой причине она мало или же совсем не изучена и может быть вскрыта только буровыми скважинами при дополнительных исследованиях. Особо следует отметить, что участок расположения предполагаемой погребённой антиклинали «пра-кэпрока» не изучался и в ходе масштабных геофизических работ 1998-2001 гг., оказавшись в стороне от большинства основных сейсмических профилей в данном районе, к тому же изучавших преимущественно глубинные структуры исследуемой территории. Наиболее представительный разрез «пра-кэпрока» (сохранившееся «ядро» слоя – грунты ИГЭ-6 и, отчасти, ИГЭ-7 и ИГЭ-8, как продукты его разрушения) при изысканиях 2015 г. был вскрыт разведочными скважинами только на участке т.н. «ядерных островов» блоков 2 и 3.

Возраст отложений «пра-кэпрока», представленных в разрезе как песчаник различной степени сохранности на глинисто-карбонатом цементе с фауной, также требует дополнительного уточнения. Предположительно, они являются обособленной частью свиты Лахбари, отложения которой достаточно широко, но фрагментарно, распространены в прибрежной зоне Загрос, вскрыты многими скважинами и относительно подробно изучены. Как известно из материалов изысканий по 1 блоку АЭС, миоценовая песчано-глинистая пачка Лахбари, приуроченная к верхам формации Агаджари, залегает под слоем «кепрока», местами под техногенными грунтами и фундаментами зданий, а вблизи моря под элювиально-делювиальными грунтами и современными пляжевыми отложениями. Она представлена известковыми суглинками, глинами и супесями со слоями, линзами, прослоями и включениями песка известкового, пылеватого и мелкого. При изысканиях 1998-1999 гг. вскрыта большинством скважин, в т.ч. и глубокими структурными скважинами С-1, С-2, С-3 в районе реакторного отделения 1 блока АЭС (1ZA/B). Однако упоминания о данной свите отсутствуют в материалах изысканий последующих лет. Анализируя материалы изысканий прежних лет, можно предположить, что в современном разрезе площадки 2 блока к свите Бахтиари условно могут быть отнесены отложения ИГЭ -3, 4, а отложения ИГЭ-5, 6, 7 и ниже вполне могут, отнесены к свите Лахбари, учитывая наличие выявленного ранее углового несогласия между «кэпроком» и подстилающими грунтами. Вопрос о положении нижней границы слоя Лахбари никогда не поднимался

в ходе выполнения изысканий. Но учитывая лишь повсеместно фрагментарный характер залегания слоя в верхах формации Агаджари при относительно малой его мощности, нижняя граница слоя не может залегать достаточно глубоко и, вероятнее всего, заканчивается на границе грунтов ИГЭ-11 и ИГЭ-12, где по данным сейсмических исследований также наличествует некая граница раздела. Но подтвердить или опровергнуть данное предположение можно также только в ходе специальных дополнительных исследований. Также требует дальнейшего изучения вопрос и происхождения отложений свиты Лахбари. Учитывая наличие загипсованности отдельных горизонтов разреза, возможно, предполагает их формирование не только в мелководных дельтовых, а также и в лагунных условиях.

В любом случае, отложения т.н. «пра-кэпрока» на площадке строительства представляют не только научный интерес с точки зрения тектоники, стратиграфии и палеонтологии, но и нуждаются также в гидрогеологическом доизучении по причине их возможной избыточной обводнённости, представляя собой фактически постоянный естественный «канал» поступления подземных вод на площадку строительства новых блоков со стороны водораздела, даже не смотря на мероприятия по укреплению грунтов оснований т.н. «ядерных островов» строящихся блоков 2 и 3. Укреплённое же основание последних, по сути, будет для этого «канала» выполнять роль своеобразной «стены в грунте» (барражной завесы), что вкуче с заглубленными сооружениями – сбросными каналами 2 и 3 блоков (соответственно, 20UQN и 30UQN) и, частично, береговыми насосными станциями 2 и 3 блоков (соответственно, 20UQA и 30UQA), будет препятствовать свободной разгрузке водоносного горизонта в Персидский Залив. Таким образом, избыточная обводнённость площадки АЭС в будущем может объясняться не близостью моря, а именно подтоком подземных вод по проницаемым отложениям вдоль оси предполагаемой антиклинали «пра-кэпрока», частично совпадающим с направлением от водораздела к площадке АЭС. После завершения строительства, именно это обстоятельство может стать одной из основных причин подтопления площадки и постоянного поступления грунтовых вод в заглубленные части зданий и сооружений АЭС, аналогичным на площадке 1 блока АЭС, но имеющих там несколько другие причины и отличную геологию. Что несомненно должно учитываться при разработке постоянной системы дренажа площадки АЭС под новые блоки.

Всё вышесказанное позволяет несколько иначе взглянуть и на аргументы иранской стороны (dr. Hessami и др.), выдвинувшей в последние годы иную трактовку тектонического строения Бушерского полуострова. В частности, она настаивала на существовании т.н. разлома Харг-Миш, якобы выраженного в рельефе полуострова и о. Шиф. Кроме разлома Харг-Миш, иранские специалисты настаивали и на существовании т.н. Бушерского разлома, обрамляющего Бушерскую антиклиналь с юго-западной стороны и параллельного её нынешней оси [18]. Вполне возможно, что предположенные иранской стороной разломные зоны в какой то степени так или иначе и были связаны с вышеуказанной реликтовой структурой, видимыми проявлениями которой и являются сохранившиеся на площадке под новое строительство отложения, именуемые автором настоящей статьи как «пра-кэпрок». А разлом Харк-Миш таким образом и является древним аналогом предполагаемого иранскими специалистами т.н. Бушерского разлома, по их мнению обрамляющего антиклинальную складку Бушерского полуострова со стороны акватории Персидского Залива.

Ещё одним дополнительным аргументом может служить отмеченное, в т.ч. и автором настоящей статьи, определённое сходство геоморфологии, геологического строения и, возможно, тектоники района п-ва Бушер и о. Харк, несмотря на их видимое различие по площади и некоторую удалённость друг от друга. Это отчасти подтверждается и промером глубин между островами Харк и Харко, имеющим, как и

между Бушерским полуостровом и о. Шиф, минимальные отметки. Тем более, что в недалёком геологическом прошлом Бушерский полуостров был островом, как ныне о. Харк, в т.н. «пра-Персидском Заливе», ранее имевшим несколько отличные от нынешнего Персидского Залива очертания. Расположение главных осей антиклинальных складок о. Харк в настоящее время в основном соответствует ориентации основной оси Бушерской антиклинали (ось «кэпрока»), в отличие от оси о. Харко, больше соответствующей ориентации оси ныне предположительно погребённой антиклинальной складки с ориентацией: о. Шиф-площадка АЭС (ось т.н. «пра-кэпрока»). А по этой причине, учитывая весьма сходную ориентацию о. Шиф и о. Харко по отношению соответственно к Бушерскому полуострову и о. Харк, не стоит исключать также и наличия под о. Харко иной, реликтовой структуры, подобной предположенной вблизи Бушерской антиклинали в районе о. Шиф. Учитывая данное и другие обстоятельства, участки расположения Бушерского полуострова и о. Харк и о. Харко вполне могли испытывать и вполне сходные тектонические процессы. Существующие разломные зоны о. Харк и о. Харко также могут быть подобны предположенным, но до сих пор так и не обнаруженным разломным зонам Бушерской антиклинали, образовавшимися в результате и одновозрастных тектонических процессов. Выявленные же в акватории вблизи о. Харк и о. Харко разломные зоны неясного пока генезиса также могут свидетельствовать о наличии таких зон и в акватории вблизи Бушерского полуострова. Следует отметить, что сведения геологического характера о островах Харк и Харко чрезвычайно скудны, учитывая особую стратегическую значимость этих территорий в экономике Ирана, и также нуждаются в дополнительном изучении и анализе.

Таким образом, исходя из вышеизложенного, становится совершенно очевидным, что инженерно-геологического доизучения требует не только сама площадка размещения новых блоков 2 и 3 АЭС «Бушер». А учитывая стратегическую важность объекта в целом, требует проведения исследований и оставшаяся недоизученная часть всего Бушерского полуострова в пределах Бушерской антиклинали с обязательным включением в район разведки о. Шиф и низинных участков между ними. Наиболее подробно должны быть изучены, причём прямыми, а не косвенными методами, грунты ИГЭ-6, 7, 8. Зона изучения грунтов ИГЭ-6, 7, 8 должна охватывать как площадки т.н. «ядерных островов» блоков 2 и 3, так и на площадку расположения строительномонтажной базы (СМБ).

Помимо выполнения собственно стандартных инженерно-геологических исследований, включая гидрогеологические работы в виде кустовых откачек, наливов или нагнетаний, также необходимо будет провести и специальные палеонтологические (в т.ч. микрофаунистические) исследования грунтов ИГЭ-6, 7, 8. Эти типы отложений в пределах площадки АЭС на современном этапе вообще не изучались, хотя в финальном отчёте «Dames & Moore» упоминалось о стратиграфии полуострова и руководящих формах, но, вероятно, речь шла не о собственных исследованиях, а об использовании в отчётах результатов ранее выполненных профильных исследований иранской стороны. Подобные исследования проводятся в регионе Персидского Залива иностранными и иранскими научными организациями и в настоящее время [19-21].

В рамках выполнения перечисленных выше перспективных исследований будет вполне уместным и выполнение работ по изучению микрогеодинамики полуострова методами радонометрии (почвенный радон и радон в воде буровых скважин), в т.ч. и в радон-гелиевом варианте, с целью выяснения возможного наличия скрытых приповерхностных разломов и оценки степени их возможной активности [22, 23]. Эти тектонические элементы вполне могут иметь определённо прямую связь с особенностями геологического строения площадки под новые блоки, касаемо грунтов ИГЭ-6, 7, 8. Следует особо отметить, что радонометрия во всех её видах до настоящего

времени никогда не проводилась не только на площадке АЭС, но и в пределах всей провинции Бушер. А между тем эти исследования уже совершенно необходимы в тектонически активных областях в свете появления нормативных документов, введённых в действие в последние годы.

Выводы

После анализа материалов инженерных изысканий прошлых лет, в т.ч. на площадке 1 и 2 блоков KWU, вскрылись некие новые обстоятельства, касаемо тектоники площадки под строящиеся блоки АЭС. Необходимость в дополнительном изучении материалов была вызвана и выявленными некоторыми существенными отличиями в геологическом строении площадки под новые блоки от площадок блоков 1 и 2 KWU, причины, появления которых пока не совсем ясны.

Главным отличием площадки под новые блоки являются вскрытые частью скважин под повсеместно развитыми отложениями суглинков и глин ИГЭ-5 отложений ИГЭ-6,7, весьма сходных с поверхностными слоями, именуемыми как «кэпрок». Однако вскрытые отложения, условно именуемые автором настоящей статьи как «*пра-кэпрок*», предположительно имеют другой возраст. Вполне возможно, что данные отложения также являются фрагментарно сохранившейся частью иной реликтовой геологической структуры – древней погребённой антиклинальной складки, ось которой имела другое расположение, отличное от расположения оси Бушерской антиклинали в настоящее время. А предположенные иранской стороной тектонические разломы Бушерской антиклинали, в т.ч. разлом Харк-Миш, вполне могут быть своеобразным проявлением этой более древней структуры.

Геология и тектоника Бушерской антиклинали вполне сходна с геологией о. Харк и окружающих островов. Расположение главных осей антиклинальной складки о. Харк в настоящее время вполне соответствует ориентации Бушерской антиклинали (ось «кэпрока»), что нельзя сказать про расположение осей о. Харк и о. Шиф, предположительно имеющих в своей основе несколько отличные геологические структуры. Разломные зоны о. Харк и акватории Персидского залива вблизи него также могут быть подобны предположенным, но до сих пор не обнаруженным разломным зонам Бушерской антиклинали, в т.ч. в её акватории.

Отложения предположенного «*пра-кэпрока*» на новой площадке нуждаются в особо тщательном гидрогеологическом доизучении по причине избыточной их обводнённости, представляя собой естественный «канал» поступления подземных вод на строительную площадку со стороны водораздела. После завершения строительства именно это обстоятельство предположительно станет одной из основных причин возможного подтопления площадки и постоянного поступления грунтовых вод в заглубленные части зданий и сооружений АЭС, аналогичным на площадке 1 блока АЭС.

Таким образом, представляется совершенно очевидным, что в инженерно-геологическом доизучении нуждается не только сама площадка размещения новых блоков 2 и 3 АЭС «Бушер», а, учитывая стратегическую значимость будущего энергетического узла в экономике ИРИ, и оставшаяся недоизученной часть всего Бушерского полуострова в пределах Бушерской антиклинали с обязательным включением в район разведки о. Шиф и низинных участков между ними. Наиболее подробно должны быть изучены, причём прямыми (в т.ч. и буровыми), а не только косвенными методами, именно грунты ИГЭ-6,7,8. Помимо выполнения собственно стандартных инженерно-геологических исследований, необходимо будет провести и специальные палеонтологические (в т.ч. микрофаунистические) исследования грунтов ИГЭ-3 и ИГЭ-6,7,8, т.к. последние в пределах площадки АЭС вообще не изучались.

В рамках выполнения перечисленных выше исследований является обоснованным и выполнение работ по изучению микрогеодинамики полуострова методами

радонометрии (почвенный радон и радон в воде буровых скважин), в т.ч. и в радон-гелиевом варианте, с целью установления предположительно скрытых приповерхностных разломов и оценки степени их активности. Результаты предполагаемых исследований, возможно, будут более значимы, т.к. радонометрия во всех её видах на площадке АЭС «Бушер» и её окрестностях никогда не проводилась.

Все предположенные исследования имеют цель обеспечения качественного проведения всего цикла строительных работ и безопасной эксплуатации уже законченных постройкой объектов АЭС «Бушер».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пендин, В. В. Организация управления подземной гидросферой на объектах атомной энергетики (на примере АЭС Бушер) / В. В. Пендин, А. С. Гусельцев А.С. – Инженерная геология. – Ноябрь 2006, – С. 21-32.
2. Бачманов, Д. М. Возрастная зональность грубой молассы внешнего Загроса и миграция новейшего орогенеза / Д. М. Бачманов // Геотектоника. – 2001. – № 6. – С. 90-94.
3. Рогожин, Е. А. Сейсмоструктурные особенности Ахрамского землетрясения 24 сентября 1999 года (Иран, Загрос) / Е. А. Рогожин // Геотектоника. – 2012. – № 5. – С. 63-74.
4. Ребецкий, Ю. Л. Определение предельных фокальных механизмов слабых землетрясений и современная геодинамика юга Ирана / Ю. Л. Ребецкий, А. А. Лукк, Р. Э. Татевосян, В. В. Быкова // Геодинамика и тектонофизика. – 2017. – № 8(4). – С. 971-988. – URL : <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0327>.
5. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности в районе Ирана: возможная подготовка сильных землетрясений / Ю. Ф. Копничев, И. Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК. – 2019. – Вып. 2. – С. 106-113.
6. Pirouz, M. Neogene sediments and modern depositional environments of the Zagros foreland basin system / M. Pirouz, G. Simpson, A. Bahroudi, A. Azdari // Geol. Mag. 148(5-6). 2011. 3. 838-853, DOI: 10.1017/S0016756811000392.
7. Sahraeyan, M. Detrital Modes of the Aghajari Formation Sandstones and Their Geological Implications, Southwest of Iran / M. Sahraeyan, Bahrami M. // World Applied Sciences Journal. 32(7): 1258-1267, 2014, DOI: 10.5829/idosi.wasj.2014.32.07.2029.
8. Шариятиния, З. Исследование миграции углеводородов в шельфовом бассейне Загрос (Иран) для изучения динамики флюидов в карбонатных коллекторах олигоцен-миоценового возраста / З. Шариятиния, М. Хажижи, С. Фейзня, А.Х. Ализай, Г. Леврессе // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54, № 1. – С. 83-105.
9. Bahrami, M. Lithofacies and Sedimentary Environments of Aghajari Formation in Dehsheikh Mountain, West of Shiraz, Iran // World Applied Sciences Journal. 6(4): 464-473, 2009.
10. Bachmanov, D. M. Active faults in the Zagros and central Iran / D. M. Bachmanov, V. G. Trifonov, Kh. T. Hessami, A. I. Kozhurin, T. P. Ivanovac, E. A. Rogozhind, M. C. Hademie, F. H. Jamali // Tectonophysics. 380. (2004). P. 221-241.
11. Макаревич, В. Н. Литолого-стратиграфические особенности и палеогеографические условия седиментации осадочного чехла провинции Дезфуль (Иран) / В. Н. Макаревич, А. А. Нехаев // Нефтяная геология. Теория и практика. – 2012. – Т. 7, № 3. – С. 1-9.
12. Jafarzadeh, N. Evaluation of drinking water quality indices (case study: Bushehr province, Iran) / N. Jafarzadeh, M. Ravanbakhsh, K. Ahmadi Angali, A.Zare Javid, Darioush, R.Vakil Abadi, S. Ardeshirzadeh. Environmental Health Engineering and Management Journal 2017. 4(2). 73-79, DOI: 10.15171/EHEM.2017.11.
13. Shahsavari, A. Determination of origin and distribution of saline water in the aquifer of Kharg Island, Iran / A. Shahsavari, K. Khodaei, F. Asadian, M. Nakhaei, A. Sardar, A. Moradi, R. Hatefi, S. M. Zamanzadeh // Arabian Journal of Geosciences. V.8. P. 3129-3137 (2015), DOI:10.1007/s12517-014-1450-7.
14. Zar'e, M. Tsunami hazard in the shorelines of Kharg island (Persian Gulf), Iran / Mehdi Zar'e, Seyed-Ahmad Hashemi, Roya Ebadi Sahar Amirnejad-Mojdehi, Roya Rahmani and Ali Sardar // Earthq Sci (2012) 25: 299-305, DOI: 10.1007/s11589-012-0855-1.
15. Mohammad-Reza Forudi Jahromi, Ali Solgi, Mohsen Pourkermani, Abdollah Saedi., Role of the Kazerun and Borazjan faults in emplacements Dashti salt dome, Boushehr / Journal of Applied Science and Agriculture, 9(4) April 2014, Pages: 1884-1892.
16. Talebian, M. Offset on the Main Recent Fault of NW Iran and implications for the late Cenozoic Tectonics of the Arabia – Eurasia collision Zone / M. Talebian, J. Jackson // Jurnal of Geophys. J. Int (2002). 150: 422-439.

17. *Vernant, P.* Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman / P. Vernant, F. Nilforoushan, D. Hatzfeld, M.R. Abbassi, C. Vigni, F. Masson, H. Nankali, F. Martinod, A. Ashtiani, R. Bayer, F. Tavakoli, J. Chery // *Journal of Geophys. J. Int* (2004). 157: 381-398.
18. *Рогожин, Е. А.* Современная практика оценки сейсмической опасности объектов ядерной энергетики / Е. А. Рогожин, Р. Э. Татевосян // *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН*. – URL : <http://atomsro.ru/wp-content/uploads/file/OPORTAL/AtomStroyStandart-2017/k6/Rogojin.pdf>.
19. *Yazdi, M.* Miocene brachyuran Crustacea from Konar-Takhteh and Ahram sections, southwestern Iran / M. Yazdi, A. Bahrami, P. Abbasi, R. Sadeghi, Francisco J. Vega // *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Vol. 65, №2. 2013. P. 225-233.
20. *Heidari, A., Feldmann, R.M., Moussavi-Harami, R.,* Miocene decapod crustacean from the Guri Member of the Mishan Formation, Bandar-Abbas, Southern Iran: *Bulletin of the Mizunami Fossil Museum* (2012). 38. P. 1-7.
21. *Vega, F.J., Gholamalian, H., Hassani, M-J., Sajadi, S-H., Schaaf, P.* Miocene Crustacea from northern Bandar Abbas, South Iran: *Neues Jahrbuch fuer Geologie und Palaontologie* (2012). 265(3), 221-234.
22. *Ульянов, В. Ю.* Мониторинг радона как индикатора сейсмотектонических событий на площадке АЭС «Бушер-1» и прилегающей территории провинции Бушер Исламской Республики Иран / В. Ю. Ульянов // *Глобальная ядерная безопасность*. – 2017. – № 4(25). – С. 7-17.
23. *Седин, В. Л.* On the possibility of evaluating the tectonic fault activity at the Akkuyu Nuclear Power Plant by sample radon measurements during environmental impact assessment / В. Л. Седин, В. Ю. Ульянов // *Вестник МГСУ*. – 2019. – Т. 14, Вып. 10. – С. 1272-1279, DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.

REFERENCES

- [1] *Pendin V.V., Guseltsev A.S.* Organizaciya upravleniya podzemnoj gidrosferoj na ob`ektax atomnoj energetiki (na primere AE`S Buser) [Organization of Management of the Underground Hydrosphere at Nuclear Power Facilities (for example, Bushehr NPP)]. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering Geology]. Moskva, noyabr` [Moscow, November] 2006. No 4. P. 21-32 (in Russian).
- [2] *Bachmanov D.M.* Vozrastnaya zonal`nost` gruboj molassy` vneshnego Zagrosa i migraciya novshego orogenez [Age Zonality of Gross Molasses of the Outer Zagros and Migration of Recent Orogenesis]. *Geotektonika* [Geotectonics]. 2001. No 6. P. 90-94 (in Russian).
- [3] *Rogozhin E.A.* Sejsmotektonicheskie osobennosti Axramского zemletryaseniya 24 sentyabrya 1999 goda (Iran, Zagros) [Seismotectonic Features of the Akhram Earthquake on September 24, 1999 (Iran, Zagros)] *Geotektonika* [Geotectonics]. 2012. No 5. P. 63-74 (in Russian).
- [4] *Rebetskiy Yu.L., Lucc A.A., Tatevosyan R.E., Bykova V.V.* Opredelenie predel`ny`x fokal`ny`x mexanizmov slaby`x zemletryasenij i sovremennaya geodinamika yuga Irana [Determination of the Limiting Focal Mechanisms of Weak Earthquakes and Modern Geodynamics of the South of Iran]. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics and Tectonophysics]. 2017. 8(4): 971-988. URL: <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0327> (in Russian).
- [5] *Kopnichev Yu.F., Sokolova I.N.* Kol`cevye struktury` sejsmichnosti v rajone Irana: vozmozhnaya podgotovka sil`ny`x zemletryasenij [Ring Structures of Seismicity in the Region of Iran: Possible Preparation of Strong Earthquakes]. *Vestnik NYaCz RK* [Bulletin of the NNC RK]. 2019. Issue 2. P. 106-113 (in Russian).
- [6] *Pirouz M., Simpson G., Bahroudi A., Azdari A.* Neogene Sediments and Modern Depositional Environments of the Zagros Foreland Basin System / *Geol. Mag.* 2011. 148(5-6). P. 838-853. DOI:10.1017/S0016756811000392.
- [7] *Sahraeyan M., Bahrami M.* Detrital Modes of the Aghajari Formation Sandstones and Their Geological Implications, Southwest of Iran / *World Applied Sciences Journal* 32(7): 1258-1267, 2014. DOI:10.5829/idosi.wasj.2014.32.07.2029.
- [8] *Shariahinia Z., Hajizhi M., Feizniya S., Alizay A.Kh., Levresse G.* Issledovaniye migratsii uglevodorodov v shel`fovom bassejne Zagros (Iran) dlya izucheniya dinamiki flyuidov v karbonatnykh kollektorakh oligotsen-miotsenovogo vozrasta [Study of Hydrocarbon Migration in the Zagros shelf (Iran) for Studying Fluid Dynamics in Carbonate Reservoirs of the Oligocene-Miocene Age]. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics]. 2013. V. 54. No 1. P. 83-105 (in Russian).
- [9] *Bahrami M.* Lithofacies and Sedimentary Environments of Aghajari Formation in Dehsheikh Mountain, West of Shiraz, Iran // *World Applied Sciences Journal*. 6(4): 464-473, 2009.

- [10] Bachmanov D.M., Trifonov V.G., Hessami Kh.T., Kozhurin A.I., Ivanovac T.P., Rogozhind E.A., Hademie M.C., Jamali F.H. Active Faults in the Zagros and Central Iran // *Tectonophysics* (2004). 380. P. 221-241.
- [11] Makarevich V.N., Nekhaev A.A. Litologo-stratigraficheskiye osobennosti i paleogeograficheskiye usloviya sedimentatsii osadochnogo chekhla provintsii Dezful' (Iran) [Lithological-Stratigraphic Features and Paleogeographic Conditions of Sedimentation of the Sedimentary Cover of the Province of Dezful (Iran)]. *Neftyanaya geologiya. Teoriya i praktika* [Petroleum Geology. Theory and Practice]. 2012. T.7., No 3. P. 1-9 (in Russian).
- [12] Nematollah Jafarzadeh, Maryam Ravanbakhsh, Kambis Ahmadi Angali, Ahmad Zare Javid, Darioush Ranjbar Wakil Abadi, Shirin Ardeshirzadeh. Evaluation of Drinking Water Quality Indices (Case Study: Bushehr Province, Iran) / *Environmental Health Engineering and Management Journal* 2017, 4(2). P. 73-79. doi 10.15171/EHEM.2017.11.
- [13] Shahsavari A., Khodaei Kamal, Asadian Farhad, Nakhaei Mohamad, Sardar Ali, Moradi Abolfazl, Hatefi Rahele, Zamanzadeh Seyed Mohammad. Determination of Origin and Distribution of Saline Water in the Aquifer of Kharg Island, Iran / *Arabian Journal of Geosciences* (2015). V.8. P. 3129-3137. DOI:10.1007/s12517-014-1450-7
- [14] Mehdi Zar'ee, Seyed-Ahmad Hashemi, Roya Ebadi Sahar Amirnejad-Mojdehi, Roya Rahmani, and Ali Sardar. Tsunami Hazard in the Shorelines of Kharg Island (Persian Gulf), Iran / *Earthq Sci* (2012) 25: 299-305. DOI:10.1007/s11589-012-0855-1.
- [15] Mohammad-Reza Forudi Jahromi, Ali Solgi, Mohsen Pourkermani, Abdollah Saedi. Role of the Kazerun and Borazjan faults in emplacements Dashti Salt Dome, Boushehr / *Journal of Applied Science and Agriculture*, 9(4). April 2014. P. 1884-1892.
- [16] Talebian M., Jackson J. Offset on the Main Recent Fault of NW Iran and Implications for the Late Cenozoic Tectonics of the Arabia – Eurasia collision Zone, *Jurnal of Geophys. J. Int* (2002). 150: 422-439.
- [17] Vernant P., Nilforoushan F., Hatzfeld D., Abbassi M.R., Vigni C., Masson F., Nankali H., Martinod F., Ashtiani A., Bayer R., Tavakoli F. Chery J. Present-Day Crustal Deformation and Plate Kinematics in the Middle East Constrained by GPS Measurements in Iran and Northern Oman. *Journal of Geophys. J. Int* (2004). 157: 381-398.
- [18] Rogozhin E.A., Tatevosyan R.E. Sovremennaya praktika otsenki seismicheskoy opasnosti ob'yektov yadernoy energetiki [Modern Practice of Assessing the Seismic Hazard of Nuclear Power Facilities]. Institut fiziki Zemli im. O.Yu. Shmidta RAN [Institute of Physics of the Earth O.Yu. Schmidt RAS]. URL: <http://atomsro.ru/wp-content/uploads/file/OPORTAL/AtomStroyStandart-2017/k6/Rogojin.pdf>, free (in Russian).
- [19] Mehdi Yazdi, Ali Bahrami, Peyman Abbasi, Reza Sadeghi, Francisco J. Vega. Miocene Brachyuran Crustacea from Konar-Takhteh and Ahram Sections, Southwestern Iran / *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 2013. Vol. 65, № 2. P. 225-233.
- [20] Heidari A., Feldmann R.M., Moussavi-Harami R. Miocene Decapod Crustacean from the Guri Member of the Mishan Formation, Bandar-Abbas, Southern Iran: *Bulletin of the Mizunami Fossil Museum*. 2012. № 38. P. 1-7.
- [21] Vega F.J., Gholamalian H., Hassani M-J., Sajadi S-H., Schaaf P. Miocene Crustacea from northern Bandar Abbas, South Iran: *Neues Jahrbuch fuer Geologie und Palaontologie*. 2012. 265(3), 221-234.
- [22] Ulyanov V.Yu. Monitoring radona kak indikatora seymotektonicheskikh sobyitiy na ploshchadke AES «Busher-1» i prilegayushchey territorii provintsii Busher Islamskoy Respubliki Iran [Monitoring of Radon as an Indicator of Seismotectonic Events at the Bushehr-1 NPP Site and the Adjacent Territory of the Bushehr Province of the Islamic Republic of Iran]. *Global'naya yadernaya bezopasnost'* [Global Nuclear Safety]. 2017. No. 4(25). P. 7-17 (in Russian).
- [23] Sedin V.L., Ulyanov V.Yu. On the possibility of evaluating the tectonic fault activity at the Akkuyu Nuclear Power Plant by sample radon measurements during environmental impact assessment [Possibility of Evaluating the Tectonic Fault Activity at the Akkuyu Nuclear Power Plant by Sample Radon Measurements during Environmental Impact Assessment]. *Vestnik MGSU*. 2019. T.14. Issue 10. P. 1272-1279. DOI: 10.22227 / 1997-0935 (in Russian).

Geology, Tectonics and Stratigraphy of the Construction Site of the New Bushehr NPP Units in the Islamic Republic of Iran as Part of Recent Geotechnical Studies

V.Yu. Ulyanov

Dnieper State Academy of Construction and Architecture, Chernyshevsky St., 24a, Dnepr, Ukraine, 49600

ORCID iD: 0000-0002-9028-3408

e-mail: vuluanov@mail.ru

Abstract – Southern Iran in the area of Zagros and the borders of the Arabian and Eurasian plates is a seismically active territory in which large industrial facilities are located, including Bushehr NPP. In this regard the relevance of studying modern geodynamics and geology of the region is understandable. The geological structure of the territory after engineering surveys of 1974-2001 no longer seemed questionable. However, after completion of engineering surveys for new NPP units in 2015, new views on some positions on seismotectonics, and later on the geology of the area, appeared. The article provides information about the geology, tectonics and stratigraphy of the region and the research area, including not covered earlier in domestic reporting materials and scientific articles, and also considered the possible reasons for the appearance of other interpretations regarding seismotectonics and geology of the area where the NPP site is located. A brief analysis of the research results, both previously completed and completed relatively recently, is presented. An additional argument is considered in favor of the presence of fault zones within the Bushehr anticline proposed by Iranian researchers. In particular, the Khark-Mish fault supposed by them may be part of the buried ancient anticlinal fold before the position of its axis changes in the modern period as a result of neotectonic processes common to the region as a whole. The geology and tectonics of the Bushehr anticline are compared with similar structures on Fr. Hark and the nearest islands. Updated information on the stratigraphy of individual geological formations of the region and the research area is also provided. In spite of the reasoned justification of various positions on the geology and tectonics of the region, it seems necessary to conduct a number of additional special direct and indirect studies aimed at ensuring the safety of the Bushehr NPPs under construction and operating.

Keywords: Islamic Republic of Iran, Bushehr NPP, Bushehr anticline, tectonic faults, active faults, seismicity, geological formation, geological formation, stratigraphy, paleontology.

ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 528.48

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ЭТАЛОНИРОВАНИЕ ВЫСОКОТОЧНЫХ
ЭЛЕКТРОННЫХ ТАХЕОМЕТРОВ ПРИ ПОМОЩИ ЛАЗЕРНОГО
ТРЕКЕРА ПРЕЦИЗИОННОЙ ТОЧНОСТИ

© 2020 Т.М. Пимшина*, Д.М. Арсеньев**, И.Ю. Пимшин***

*Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), Ростов-на-Дону, Россия

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

***ООО «НПФ «Инженерная геодезия», Ростов-на-Дону, Россия

В статье рассмотрены вопросы повышения точности измерений, что особенно важно при монтаже и эксплуатации технологического оборудования. Представлена методика исследования точности определения прямоугольных координат контролируемых точек, измеренных электронным тахеометром. Для метрологического эталонирования высокоточных электронных тахеометров на коротких расстояниях (до 60 м) предлагается использовать лазерный трекер прецизионной точности. Приведены результаты практического апробирования предложенного способа метрологического эталонирования высокоточного электронного тахеометра.

Ключевые слова: координатно-измерительная система; электронный тахеометр; лазерный трекер; инструментальные погрешности измерений; повышение точности; определение прямоугольных координат контролируемых точек; поправки в результаты замеров.

Поступила в редакцию 20.10.2020

После доработки 28.10.2020

Принята к печати 03.11.2020

Одним из основных условий решения производственных задач является критерий точности. Общеизвестно, что основными источниками ошибок измерений являются личные, инструментальные и обусловленные влиянием внешней среды. Личные ошибки исключаются внедрением автоматизации измерений. Ошибки, обусловленные влиянием внешней среды, учитываются введением поправок за метеоданные, выбора оптимального времени, когда воздействие внешних факторов минимально и т.д. Инструментальные ошибки минимизируются метрологическим эталонированием средств измерений [1]. Данный подход для повышения точности замеров позволяет выполнять геодезические работы на пределе точностной возможности приборов, что особенно актуально при контроле геометрических параметров для монтажа или эксплуатации технологического оборудования.

На сегодняшний момент времени наиболее популярными геодезическими приборами являются электронные тахеометры, являющиеся универсальными координатно-измерительными системами, объединяющими в себе электронный теодолит, светодальномер и микроЭВМ [2]. Электронные тахеометры работают в полярной системе координат, то есть измеряют горизонтальные, вертикальные углы и наклонные расстояния от прибора до контролируемой точки. У современных тахеометров паспортная точность измерения углов варьируется в пределах от 0,5" до 6" и наклонных расстояний в пределах от $\pm(0,5+1 \text{ мм/км}\times D)\text{мм}$ до $\pm(3+2 \text{ мм/км}\times D)\text{мм}$. Однако при расчетах, обработке и анализе данных наиболее удобно использовать прямоугольную систему координат. Приведем формулы (1) и (2) перевычисления [3] полярной системы координат в прямоугольную систему координат:

$$x_i = x_{CT} + \Delta x_i = x_{CT} + S_i \cos \nu_i \cos \alpha_i, \quad (1)$$

$$y_i = y_{CT} + \Delta y_i = y_{CT} + S_i \cos \nu_i \sin \alpha_i, \quad (2)$$

где x_i, y_i – прямоугольные координаты контролируемых точек;

x_{CT}, y_{CT} – прямоугольные координаты станции стояния прибора;

$\Delta x_i, \Delta y_i$ – приращения координат между прибором и контролируемыми точками;

ν_i, α_i – вертикальные и горизонтальные углы, измеряемые прибором;

S_i – измеряемые наклонные расстояния от прибора до искомым точек.

Используя данные формулы, перешли к их средним квадратическим ошибкам, формулы (3)-(5):

$$m_x^2 = m_{x_{CT}}^2 + m_S^2 \cos^2 \nu \cos^2 \alpha + S^2 \sin^2 \nu \cos^2 \alpha \frac{m_\nu^2}{\rho''^2} + S^2 \cos^2 \nu \sin^2 \alpha \frac{m_\alpha^2}{\rho''^2}, \quad (3)$$

$$m_y^2 = m_{y_{CT}}^2 + m_S^2 \cos^2 \nu \sin^2 \alpha + S^2 \sin^2 \nu \sin^2 \alpha \frac{m_\nu^2}{\rho''^2} + S^2 \cos^2 \nu \cos^2 \alpha \frac{m_\alpha^2}{\rho''^2}, \quad (4)$$

$$m_{xy} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2}, \quad (5)$$

где m_x, m_y, m_{xy} – средние квадратические ошибки определения прямоугольных координат контролируемых точек;

x_{CT}, y_{CT} – средние квадратические ошибки прямоугольных координат станции стояния прибора;

m_ν, m_α, m_S – средние квадратические ошибки измерения вертикальных, горизонтальных углов и наклонного расстояния;

ρ – один радиан, угол образованный двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу, $\rho = 180^\circ/\pi$.

Используя вышеприведенные формулы, построим график зависимости средних квадратических ошибок определения прямоугольных координат контролируемых точек от точности измерений углов и расстояний, а также величин горизонтальных углов (рис. 1). Варьирования были приняты следующие. Горизонтальные углы изменялись в пределах от 0° до 180° . Величина вертикального угла была принята 0° . Наклонное расстояние взяли равным 50 м. Средние квадратические ошибки измерения углов были приняты $1''$, а определения наклонных расстояний 1 мм.

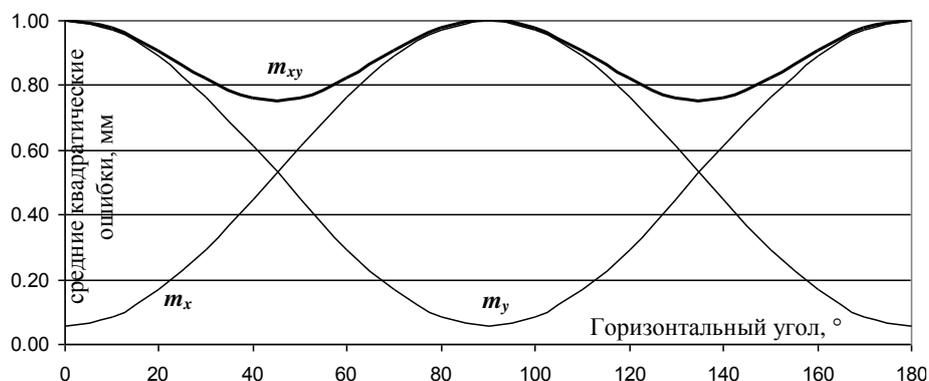


Рисунок 1 – График зависимости средних квадратических ошибок определения прямоугольных координат (m_x, m_y, m_{xy}) электронным тахеометром [Graph of the dependence of the mean square errors in determining rectangular coordinates (m_x, m_y, m_{xy}) by an electronic tacheometer]

Если измерения выполняются с одной станции в системе координат электронного тахеометра, то средними квадратическими ошибками координат станции стояния прибора, а также его высотой можно пренебречь. В этом случае средние квадратические ошибки положения плано-высотных координат контролируемых точек прямо пропорциональны величинам измеряемых горизонтальных, вертикальных углов и наклонных расстояний, а также погрешностям их измерений [4, 5].

Для метрологического эталонирования высокоточного электронного тахеометра на коротких расстояниях (до 80 м) предлагается использовать лазерный трекер. Трекер также как и тахеометр работает в полярной системе координат, то есть измеряют горизонтальные, вертикальные углы и наклонные расстояния. При этом точность измерений лазерного трекера на порядок выше, чем у любого электронного тахеометра. Например, у FARO Laser Tracker Vantage паспортная точность измерения углов составляет $\pm 20 \text{ мкм} + 5 \text{ мкм/м}$ ($\pm 0,0008'' + 0,0002''/\text{м}$) и наклонных расстояний $\pm 16 \text{ мкм} + 0,8 \text{ мкм/м}$ [6, 7].

Методика исследования точности измерения прямоугольных координат электронным тахеометром при помощи лазерного трекера заключается в следующем. Данные приборы на штативах вплотную друг к другу устанавливаются в конце коридора, размер которого должен быть не менее 50 м. Системы координат обоих приборов ориентируют вдоль коридора. Затем вдоль оси абсцисс электронного тахеометра на расстоянии минимального фокусного расстояния устанавливают отражатель лазерного трекера на специальном штативе. По данному отражателю выполняют одновременные многократные измерения электронным тахеометром и лазерным трекером (рис. 2). Первый замер является исходным (базовым) для всех других измерений в данном (первом) цикле. После этого отражатель лазерного трекера на специальном штативе последовательно перемещается вдоль оси абсцисс электронного тахеометра с шагом порядка 1 м до конца коридора. При каждой постановки отражателя выполняются многократные измерения электронным тахеометром и лазерным трекером (первый цикл измерений). Затем трекер тахеометра разворачивают на головке штатива на угол равный порядка 45° и все вышеописанные действия повторяют (второй цикл измерений). Вышеописанные действия повторяют и при развороте трекера тахеометра относительно его первоначального положения на угол 90° (третий цикл измерений).

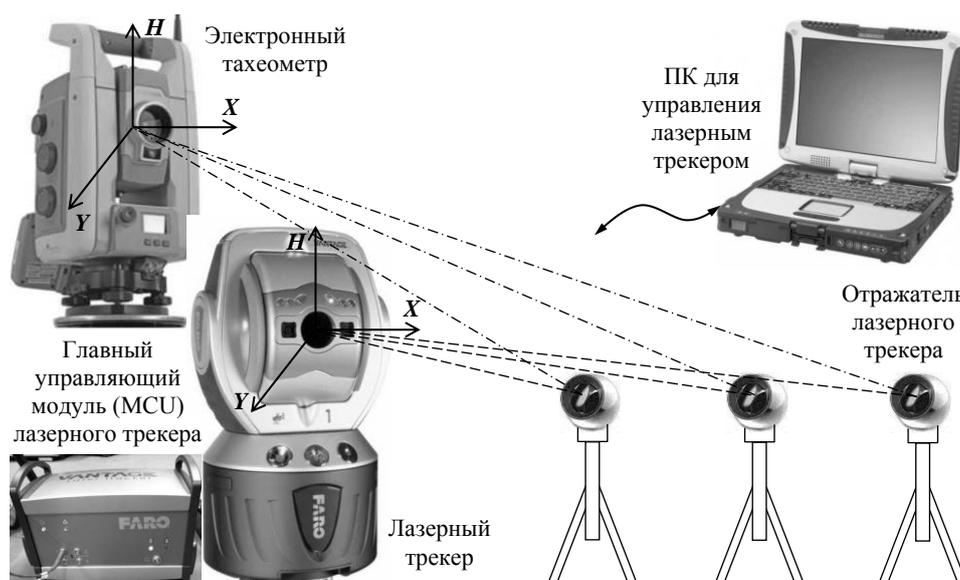


Рисунок 2 – Схема метрологическое эталонирование высокоточного электронного тахеометра при помощи лазерного трекера [Scheme of metrological standardization of a high-precision electronic tacheometer using a laser tracker]

Обработка результатов измерений для одного цикла выполняется в следующей последовательности. По общеизвестным формулам (6)-(10) [8] выполняют преобразование прямоугольных координат при одновременном переносе и повороте осей системы координат лазерного трекера в систему координат электронного тахеометра:

$$\theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{y_n^{mp.}}{x_n^{mp.}}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{y_n^{max.}}{x_n^{max.}}\right), \quad (6)$$

$$x_0 = x_i^{max.} - x_i^{mp.} \cos \theta + y_i^{mp.} \sin \theta = -x_i^{mp.} + x_i^{max.} \cos \theta + y_i^{max.} \sin \theta, \quad (7)$$

$$y_0 = y_i^{max.} - x_i^{mp.} \sin \theta - y_i^{mp.} \cos \theta = -y_i^{mp.} - x_i^{max.} \sin \theta + y_i^{max.} \cos \theta, \quad (8)$$

$$x_i^{n.mp.} = (x_i^{max.} - x_0) \cos \theta + (y_i^{max.} - y_0) \sin \theta, \quad (9)$$

$$y_i^{n.mp.} = -(x_i^{max.} - x_0) \sin \theta + (y_i^{max.} - y_0) \cos \theta, \quad (10)$$

где θ – угол разворота системы координат лазерного трекера относительно системы координат электронного тахеометра;

x_0, y_0 – несовпадение начал систем координат приборов;

$x_i^{max.}, y_i^{max.}$ – координаты точек измеренные электронным тахеометром;

$x_i^{mp.}, y_i^{mp.}$ – координаты точек измеренные лазерным трекером;

$x_i^{n.mp.}, y_i^{n.mp.}$ – координаты контролируемых точек лазерного трекера преобразованные в систему координат электронного тахеометра.

Преобразование прямоугольных декартовых координат точек, измеренных лазерным трекером, в систему координат электронного тахеометра нужно сделать для каждого цикла по отдельности. Затем для каждого цикла по отдельности вычисляют разность преобразованных координат, измеренных лазерным трекером, с координатами, определенными электронным тахеометром по формулам (11) и (12):

$$\Delta_{Xi} = x_i^{max.} - x_i^{n.mp.}, \quad (11)$$

$$\Delta_{Yi} = y_i^{max.} - y_i^{n.mp.}, \quad (12)$$

где Δ_{Xi}, Δ_{Yi} – погрешности измерения координат электронным тахеометром на разных измеряемых расстояниях.

Общие (абсолютные) погрешности измерения прямоугольных координат электронным тахеометром на разных расстояниях определяются по формуле (13):

$$\Delta_{XYi} = \sqrt{\Delta_{Xi}^2 + \Delta_{Yi}^2}. \quad (13)$$

По полученным абсолютным погрешностям строят график их зависимости от величины измеряемых расстояний и вычисляют среднюю квадратическую ошибку определения прямоугольных координат электронным тахеометром на коротких расстояниях по формуле (14) Гаусса:

$$m_{xyi} = \sqrt{\frac{\sum \Delta_{xyi}^2}{n}}. \quad (14)$$

По предложенному способу метрологического эталонирования высокоточного электронного тахеометра при помощи лазерного трекера выполнено практическое апробирование. Для этого использовался лазерный трекер FARO Laser Tracker Vantage и высокоточный роботизированный электронный тахеометр *Trimble S6* с паспортной точностью измерения горизонтальных и вертикальных углов 1" и точностью измерений наклонных расстояний $\pm 0,8 \text{ мм} + 1 \text{ мм D} \times 10^{-6}$.

Пример графика зависимости полученных абсолютных погрешностей прямоугольных координат контролируемых точек от величин измеряемых расстояний и горизонтального угла, равного 45° , приведен на рисунке 3.

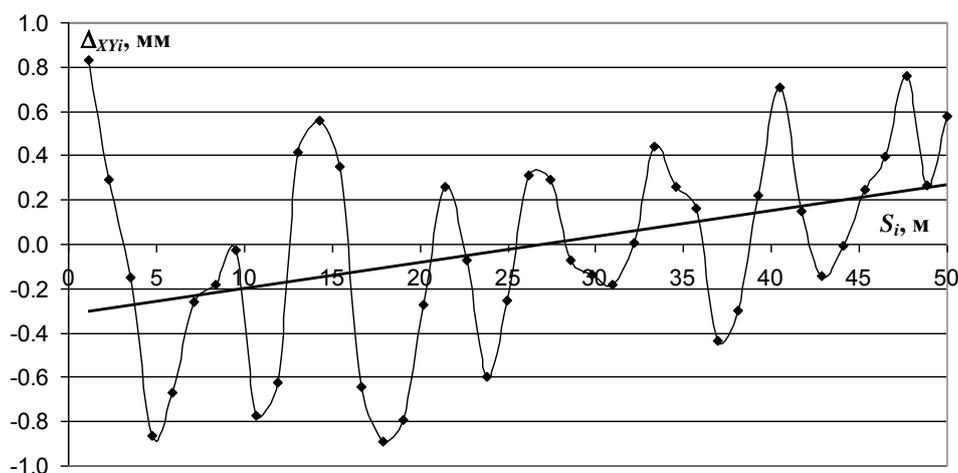


Рисунок 3 – График зависимости абсолютных погрешностей прямоугольных координат от величин измеряемых расстояний, измеренных электронным тахеометром [The graph of the dependence of the rectangular coordinates absolute errors on the values of the measured distances measured by an electronic tacheometer]

Средняя квадратическая ошибка определения прямоугольных координат электронным тахеометром *Trimble S6* на коротких расстояниях (до 50 м) составила 0,45 мм, что превышает его паспортную точность почти в 2 раза. Таким образом, исследована реальная (фактическая) точность измерения прямоугольных координат электронным тахеометром для различных расстояний (от 1,2 до 50 м) и горизонтальных углов (0° , 45° , 90°), что обеспечивает возможность достижения предельной инструментальной точности измерений. Это особенно важно при определении геометрических параметров для монтажа и эксплуатации технологического оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 8.009-1984 Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. – Москва : Стандартинформ, 2006. – 27 с.
2. ГОСТ Р 51774-2001 Тахеометры электронные. Общие технические условия. – Москва : ИПК издательство стандартов, 2001. – 12 с.
3. Губеладзе, А. Р. Методика эталонирования электронных дальномеров и тахеометров / А. Р. Губеладзе, Г. А. Науменко, Л. Ф. Литвинова, И. Г. Гайрабеков, И. Ю. Пимшин // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2008. – Специальный выпуск. – С. 113-116.
4. Пимшин, И. Ю. Исследование зависимости погрешностей взятия отсчетов геодезическими электронными приборами от расстояния между прибором и

- визирной целью / И. Ю. Пимшин, Т. М. Пимшина // Сборник научных трудов международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство» (TRANSPORT-2016). 12-15 апреля 2016 г. – Ростов-на-Дону : ФГБОУ ВО РГУПС, 2016. – С.101-103.
5. Пимшина, Т. М. Исследование влияния циклических ошибок светодальномеров на измерения электронных тахеометров / Т. М. Пимшина, И. Ю. Пимшин, А. А. Забарин // Сборник научных трудов конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России» (TRANSPROMEK-2018). 01-02 марта 2018 г. – Ростов-на-Дону : ФГБОУ ВО РГУПС, 2018. – С. 162-165.
 6. Ткачев, К. Н. Лазерная координатно-измерительная система FARO Laser Tracker / К.Н. Ткачев // Контроль. Диагностика. – 2006. – № 12. – С. 59-61.
 7. Гришанов, В. Н. Современные лазерные измерительные системы В производственном цикле космической техники / В. Н. Гришанов, А. А. Ойнонен // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – № 1 (32). – С. 24-35.
 8. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – Москва : Наука, 1978. – 831 с.

REFERENCES

- [1] GOST 8.009-1984 Normiruyemyye metrologicheskiye kharakteristiki sredstv izmereniy [Standardized Metrological Characteristics of Measuring Instruments]. Moskva: Standartinform [Moscow: Standartinform]. 2006. 27 p. (in Russian).
- [2] GOST R 51774-2001 Takheometry elektronnyye. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya [Electronic Tacheometers. General Specifications]. Moskva : IPK izdatel'stvo standartov [Moscow: IPK Publishing House of Standards]. 2001. 12 p. (in Russian).
- [3] Gubeladze A.R., Naumenko G.A., Litvinova L.F., Gairabekov I.G., Pimshin I.Yu. Metodika etalonirovaniya elektronnykh dal'nomerov i takheometrov [Method of Standardization of Electronic Rangefinders and Tacheometers]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskiye nauki [News Of Higher Educational Institutions. North Caucasian Region. Technical Science]. Spetsial'nyy vypusk [Special issue]. P. 113-116 (in Russian).
- [4] Pimshin I.Yu., Pimshina T.M. Issledovaniye zavisimosti pogreshnostey vzyatiya otschetov geodezicheskimi elektronnyimi priborami ot rasstoyaniya mezhdub priborom i vizirnoy tsel'yu [Investigation of the Dependence of the Sampling Errors by Geodetic Electronic Devices on the Distance between the Device and the Sighting Target]. Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Transport: nauka, obrazovaniye, proizvodstvo» (TRANSPORT-2016) [Collection of Scientific Papers of the International Scientific-Practical Conference "Transport: Science, Education, Production" (TRANSPORT-2016)]. 12-15 aprelya 2016 g. Rostov-na-Donu: FGBOU VO RGUPS [April 12-15, 2016. Rostov-on-Don: FGBOU VO RGUPS]. 2016. P. 101-103 (in Russian).
- [5] Pimshina T.M., Pimshin I.Yu., Zabarin A.A. Issledovaniye vliyaniya tsiklicheskih oshibok svetodal'nomerov na izmereniya elektronnykh takheometrov [Investigation of the Influence of Cyclic Errors of Light Rangefinders on the Measurements of Electronic Tacheometers]. Sbornik nauchnykh trudov konferentsii «Aktual'nyye problemy i perspektivy razvitiya transporta, promyshlennosti i ekonomiki Rossii» (TRANSPROMEK-2018) [Collection of Scientific Papers of the Conference "Actual Problems and Prospects for the Development of Transport, Industry and Economy of Russia" (TRANSPROMEK-2018)]. 01-02 marta 2018 g. Rostov-na-Donu: FGBOU VO RGUPS [March 01-02, 2018. Rostov-on-Don: FGBOU VO RGUPS]. 2018. P. 162-165 (in Russian).
- [6] Tkachev K.N. azernaya koordinatno-izmeritel'naya sistema FARO Laser Tracker [Laser Coordinate-Measuring System FARO Laser Tracker]. Kontrol'. Diagnostika [Control. Diagnostics]. 2006. No.12. P. 59-61 (in Russian).
- [7] Grishanov V.N., Oinonen A.A. Sovremennyye lazernyye izmeritel'nyye sistemy V proizvodstvennom tsikle kosmicheskoy tekhniki [Modern laser measuring systems In the production cycle of space technology]. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta [Bulletin of the Samara State Aerospace University]. 2012. No.1(32). P. 24-35 (in Russian).
- [8] Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Handbook of Mathematics for Scientists and Engineers]. Moskva: Nauka [Moscow: Science]. 1978. 831 p. (in Russian).

Metrological Standardization of High-Precision Electronic Tacheometers Using a Precision Laser Tracker

T.M. Pimshina ^{*1}, D.M. Arseniev ^{**2}, I.Yu. Pimshin ^{***3}

**Rostov State Transport University (RGUPS), Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., 2,
Rostov-on-Don, Russia 344038*

***Don State Technical University, Socialisticheskaya st., 162, Rostov-on-Don, Russia 344022*

**** LLC «NPF» «Engineering Geodesy», Rostov-on-Don, Russia*

¹ORCID iD: 0000-0002-3776-398X

WoS Researcher ID: ABB-8364-2020

e-mail: pimshina.tat@yandex.ru

²ORCID iD: 0000-0002-9336-8327

WoS Researcher ID: ABB-9307-2020

e-mail: dima81-07@mail.ru

³ORCID iD: 0000-0002-8267-3617

WoS Researcher ID: O-8809-2018

e-mail: ivan.pimschin@yandex.ru

Abstract – The article discusses the issues of increasing the accuracy of measurements which is especially important in the installation and operation of technological equipment. The paper presents a technique for studying the accuracy of determining the rectangular coordinates of the controlled points measured by an electronic tacheometer. It is proposed to use a precision laser tracker for metrological standardization of high-precision electronic tacheometers at short distances (up to 60 m). The results of practical testing of the proposed method of metrological standardization of a high-precision electronic tacheometer are presented.

Keywords: coordinate measuring system; electronic tacheometer; laser tracker; instrumental measurement errors; increased accuracy; determination of rectangular coordinates of controlled points; corrections to the measurement results.

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

УДК 621.86.06

**ВАРИАНТ ПРИМЕНЕНИЯ СЪЕМНОГО РЫЧАГА ЗАХВАТА
КАНТОВАНИЯ ЭЛЛИпсоИДНЫХ ДНИЩ КОРПУСНОГО
ОБОРУДОВАНИЯ АЭС**

П.Д. Кравченко^{*}, Ю.П. Косогова^{*}, М.А. Гашнева^{}, А.Ф. Ковалев^{***}**

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

^{**}филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, Волгодонск, Ростовская обл., Россия

^{***}АО «Волгодонскатомэнергоремонт», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

Представлен расчет на прочность и жесткость съемного захвата для перемещения и кантования эллипсоидных днищ корпусного оборудования. Предложенное конструктивное решение позволит снизить трудо- и материалоемкость технологической оснастки и отказаться от привариваемых грузозахватных и установочных элементов.

Ключевые слова: съемные грузозахватные устройства, кантование и перемещение, расчет на прочность, толщина захвата.

Поступила в редакцию 10.11.2020

После доработки 17.11.2020

Принята к публикации 24.11.2020

Технологический процесс сборочно-сварочных операций при изготовлении корпуса парогенератора ПГВ-1000 предусматривает применение привариваемых к эллипсоидным днищам грузозахватных и технологических установочных элементов с последующим их срезанием. Изготовление указанных элементов, приварка к днищам, последующее их удаление занимают достаточный период времени. Аналогичный процесс наблюдается и при изготовлении эллипсоидных днищ корпуса реактора ВВЭР-1000, работающего в первом контуре, характеризующемся наивысшем уровнем радиации [1-4]. В местах приварки и последующего срезания указанных элементов в корпусах эллипсоидных днищ могут образоваться зоны неравновесной структуры стали, образованной смесью металла днища, металла электродов, флюсов. Такое состояние может привести к появлению межкристаллитной коррозии и радиационного охрупчивания. Указанное явление за время эксплуатации корпусного реакторного оборудования ранее не наблюдалось, однако его появление не исключено. Кроме того, изготовление десятков и сотен грузозахватных и технологических установочных элементов является весьма трудоемкой и длительной технологической операцией, что невыгодно экономически [5-7]. В этом случае отказ от приварных элементов является целесообразным.

Обоснование контура рычага в плане

С целью оптимизации расхода материала (листовая прокатная сталь) и минимизации затрат на технологическую обработку принимаем схему рычага в виде двух полуколец толщиной 60 мм каждое, охватывающих крышку днища по наружной цилиндрической поверхности и шарнирно соединенных в точке А (рис 1.) Конструктивно рычаг представляет собой криволинейный стержень большой кривизны с геометрической осью в виде дуги окружности. Совместим геометрическую ось кольца с точкой приложения продольной силы (т. О) и центром шарнирного

Расчет на прочность рычага

Рычаг, как конструктивный элемент, шарнирно соединен с захватом, и служит для зажима кромки эллиптического днища реактора при его кантовании и перемещении к заданным технологическим позициям. Проводим касательную к геометрической оси, параллельную силовой плоскости (направлению силы F_n). Она практически совпала с точкой В. Восстанавливая перпендикуляр к касательной в точке В, получаем след опасного поперечного сечения.

Находим внутренние усилия в опасном сечении:

$N = F_n = G = 520$ кН – растягивающая продольная сила;

$M = F_n \cdot h = 520 \cdot 0,56 = 291$ кН·м – изгибающий момент, растягивающий внутренние волокна стержня.

Расчёт на прочность по нормальным напряжениям (подбор высоты сечения h)

Используя условие прочности кривого стержня большой кривизны, испытывающего изгиб с растяжением [9], получим формулу (2):

$$\frac{M \cdot h_B}{S_x \cdot R_B} + \frac{N}{A} \leq [\sigma], \quad (2)$$

где M – изгибающий момент в сечении;

N – продольная сила в сечении;

A – площадь поперечного сечения;

$S_x = Ae$ – статический момент площади относительно нейтральной оси сечения;

e – эксцентриситет, то есть расстояние между геометрической осью и нейтральной линией при чистом изгибе;

h_B – расстояние от нейтральной линии до внутренних волокон стержня;

R_B – радиус кривизны внутренних волокон стержня (рис. 2);

$[\sigma]$ – допускаемое напряжение стали при изгибе.

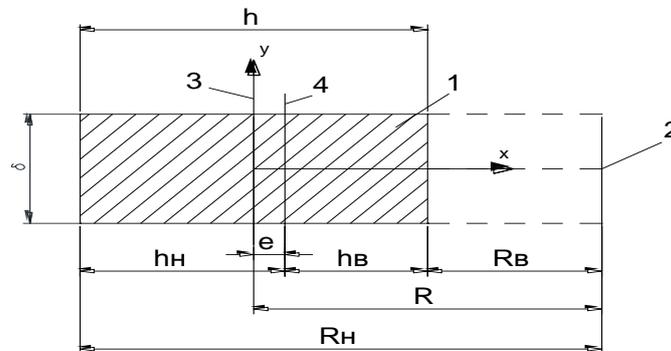


Рисунок 2 – Поперечное сечение кривого стержня большой кривизны: 1 – сечение стержня; 2 – центр кривизны нейтрального слоя; 3 – геометрическая ось сечения; 4 – нейтральная линия; e – эксцентриситет
[Cross-section of a curved bar of large curvature: 1 – bar section; 2 – center of curvature of the neutral layer; 3 – geometric axis of the section; 4 – neutral line; e – eccentricity]

Силовые параметры определены выше: $M=291$ кН·м; $N=520$ к Н.

Определяем площадь сечения:

$$A = \delta \cdot h = 120 h ;$$

эксцентриситет для прямоугольного сечения:

$$e = \frac{h^2}{12R} = \frac{h^2}{12 \cdot 360} = 0,000231 h^2 ;$$

статический момент площади сечения:

$$S_x = Ae = 120h \cdot 0,000231h^2 = 0,028h^3 ;$$

ордината внутреннего волокна:

$$h_B = \frac{h}{2} - e = 0,5h - 0,000231h^2 ;$$

радиус кривизны внутреннего волокна:

$$R_B = R - \frac{h}{2} = 360 - 0,5h.$$

Механические характеристики: принимаем высокопрочную легированную сталь 08X18H10T лист толстый ГОСТ 7350-77. Временное сопротивление $\sigma_{вр} = 509$ МПа. Коэффициент запаса прочности при расчете по временному сопротивлению $n=2,5$ [8]. Допускаемое напряжение $[\sigma] = \frac{\sigma_{вр}}{n} = 204$ МПа. Подставляем найденные параметры в условие прочности (формула 2):

$$\frac{2,91 \cdot 10^6(0,5h - 0,000231h^2)}{0,028h^3(360 - 0,5h)} + \frac{520 \cdot 10^3}{120h} \leq 204.$$

После упрощения получаем кубическое уравнение:

$$h^3 - 741h^2 - 8266h + 0,51 \cdot 10^8 = 0.$$

Оно имеет три действительных корня: $h_1 = 623$ мм; $h_2 = 351$ мм; $h_3 = -233$ мм. Принимаем наименьший положительный корень в качестве искомого решения: $h = h_2 \approx 350$ мм.

При найденной высоте сечения внутренняя цилиндрическая поверхность рычага не описывает контур днища, то есть заходит на внутренний угол сечения эллипсоида. Таким образом, данное решение технически некорректно.

Не изменяя исходных предпосылок (конструктивной схемы с заданными координатами опорных точек О и А), возможны два варианта уточнения решения. Первый вариант – изготовление рычага переменного сечения, то есть усложнение технологии обработки. Второй вариант – принять технологически допустимую высоту сечения h и найти требуемую толщину рычага δ .

Рассмотрим второй вариант, принимая $h = 300$ мм. Геометрические параметры сечения:

площадь сечения:

$$A = \delta \cdot h = 300\delta;$$

эксцентриситет:

$$e = R - h / \ln \frac{R_H}{R_B} = 360 - 300 / \ln \frac{510}{210} = 22 \text{ мм};$$

статический момент площади сечения:

$$S_x = Ae = 300\delta \cdot 22 = 6600\delta;$$

ордината внутреннего волокна:

$$h_b = \frac{h}{2} - e = 150 - 22 = 128 \text{ мм};$$

радиус кривизны внутреннего волокна:

$$R_b = R - \frac{h}{2} = 360 - 150 = 210 \text{ мм}.$$

Используем условие прочности (формула 2):

$$\frac{2,91 \cdot 10^6 \cdot 128}{6600\delta \cdot 210} + \frac{520 \cdot 10^3}{300\delta} \leq 204;$$

$$\delta \geq \frac{\left(\frac{2,91 \cdot 10^6 \cdot 128}{6600 \cdot 210} + \frac{520 \cdot 10^3}{300}\right)}{204} = 140 \text{ мм}.$$

Необходимо принять толщину листа $\delta_l = \frac{\delta}{2} = \frac{140}{2} = 70 \text{ мм}$.

Проверка прочности по контактным напряжениям

Воспользуемся условием прочности по контактным напряжениям:

$$\sigma_{max} \leq [\sigma]_k,$$

где σ_{max} – наибольшие по модулю напряжения в зоне контакта кулачка и цилиндрической части днища, $[\sigma]_k$ – допускаемое контактное напряжение, наибольшее напряжение определяем по табл. 60 [9]. С учётом того, что радиус цилиндрической части днища на порядок больше радиуса кулачка ($\frac{R_{цб}}{R_k} = \frac{2050}{150} \approx 14$) принимаем схему касания цилиндр – плоскость (рис. 3).

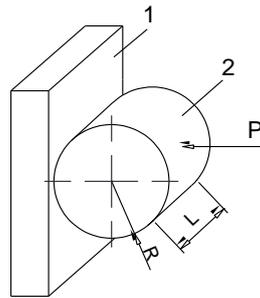


Рисунок 3 – Схема касания в зоне контакта: 1 – цилиндрическая кромка днища; 2 – кулачок рычага
[The scheme of tangency in the contact zone: 1 – cylindrical bottom edge; 2 – lever cam]

Наибольшее напряжение в этом случае при коэффициенте Пуассона для стали $\mu = 0,3$ определяем по формуле (3) [9]:

$$\sigma_{max} = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{PE}{lR}}, \quad (3)$$

где E – модуль упругости первого рода. Принимая $P = F_n = 520 \text{ кН}$; $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; $l = 2\delta = 140 \text{ мм}$; $R = 150 \text{ мм}$, получаем:

$$\sigma_{max} = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{520 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^5}{140 \cdot 150}} = 930 \text{ МПа.}$$

Допускаемое напряжение для наибольшего напряжения в зоне контакта находим по формуле (4):

$$[\sigma]_к = \frac{1}{m} \cdot [\sigma], \quad (4)$$

где $[\sigma]$ – допускаемое напряжение при сжатии;

m – коэффициент, зависящий от отношения полуосей эллипса площадки контакта.

Для рассматриваемого случая при использовании 4-й теории прочности $m = 0,557$.
Находим допускаемое контактное напряжение:

$$[\sigma]_к = \frac{1}{0,557} \cdot 204 = 366 \text{ МПа.}$$

Подставляя в условие прочности, получаем $930 > 366$ – контактное напряжение в 2,5 раза превышает допускаемое, что приведёт к существенным пластическим деформациям в зоне соприкосновения кулачка и дна при отрыве последнего от основания. Устранить пластическую деформацию в месте контакта рычага с кромкой возможно при увеличении радиуса кулачка $R \rightarrow \infty$, то есть до плоскости (рис. 4).

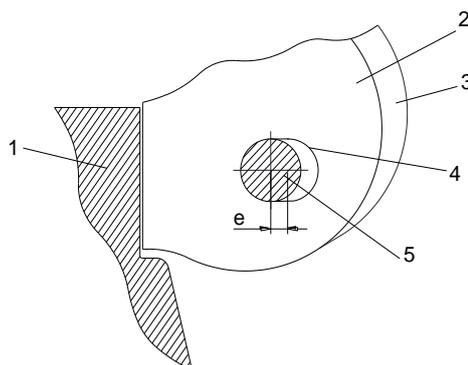


Рисунок 4 – Вариант конструкции рычага с плоской опорной поверхностью; 1 – кромка дна; 2 – рычаг; 3 – захват; 4 – паз в захвате; 5 – ось рычага; e – эксцентриситет [Lever design option with flat bearing surface; 1 – bottom edge; 2 – lever; 3 – capture; 4 – groove in the grip; 5 – axis of the lever; e – eccentricity]

Величина эксцентриситета определяется из условия сборки захватного устройства и ориентировочно составляет 3-5 мм. В этом случае контактное напряжение в месте контакта рычага с кромкой будет на порядок ниже величины напряжения по схеме контакта радиуса с плоскостью. Так как в новом варианте контакт происходит уже по поверхности, то производим расчет не контактных напряжений, а напряжений смятием. Под смятием понимается пластическая деформация, возникающая в соединениях на поверхности контакта. Возникающие при этом напряжения являются нормальными и их закон распределения по поверхности контакта достаточно сложен. Упрощая расчет, принимаем площадь опорной поверхности $A = 140 \cdot 100 = 14 \cdot 10^3 \text{ мм}^2$. Тогда напряжение смятия будет следующим:

$$\sigma_{см} = \frac{F}{A} = \frac{520 \cdot 10^3}{14 \cdot 10^3} = 37,14 \text{ МПа} < [\sigma_{см}] = 366 \text{ МПа.}$$

Таким образом, при использовании предложенного захватного устройства напряжение смятия на порядок меньше допускаемого напряжения.

Вышеприведенные допущения обоснованы согласно принципам расчетных обоснований в инженерных расчетах конструкций. На наш взгляд, применение съёмных грузозахватных устройств вместо используемых в настоящее время приварных, значительно упростит процессы кантования и перемещения эллипсоидных днищ корпусного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Protasov, A. V. Modern development tendencies of ladle vacuum treatment / A. V. Protasov, B. A. Sivak // Тяжелое машиностроение. – 2019. – № 5-6. – С. 60-63.
3. Абузов, А. В. Автоматизация управления подъемно-транспортными механизмами при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций / А. В. Абузов, Я. А. Абузов // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 7. – URL : ivdon.ru/magazine/archive/n7y2019/6104.
4. Кравченко, П. Д. Вариант конструктивного исполнения устройства точного позиционирования захвата для подъема упавших кассет в реакторе типа ВВЭР / П. Д. Кравченко, Д. Н. Федоренко, Ю. П. Косонова // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 1(30). – С. 101-105.
5. Цовьянов, А. А. Особенности термической обработки сварных соединений крупногабаритных агрегатов при монтаже АЭС / А. А. Цовьянов, Ю. Н. Кокорев, Д. В. Ходаков, Д. А. Пралиев // Сварочное производство. – 2014. – № 11. – С. 47-52.
6. Боринцев, А. Б. Влияние технологии изготовления патрубков крышки реактора типа ВВЭР-1000 на напряженно-деформированное состояние конструкции при эксплуатации / А. Б. Боринцев, В. Г. Федосов // Тяжелое машиностроение. – 2009. – № 1. – С. 2-5.
7. Холопов, А. А. Транспортировка и монтаж укрупненных элементов АЭС / А. А. Холопов, К. А. Дудкевич, Б. К. Пергаменщик // Вестник МГСУ. – 2010. – № 4-2. – С. 266-274.
8. Кравченко, П. Д. Расчетное обоснование способа применения съёмных грузозахватных устройств при перемещении эллипсоидных днищ корпусного оборудования АЭС / П. Д. Кравченко, Ю. П. Косонова, С. Ф. Годунов, Т. В. Антонова, В. А. Леонов // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 1. – URL : http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_15_1_Kravchenko.pdf_37ffaf2207.pdf.
9. Писаренко, Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – Киев : Наукова думка, 1988. – 736 с.

REFERENCES

- [1] 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.
- [2] Protasov A.V., Sivak B.A. Modern Development Tendencies of Ladle Vacuum Treatment. Tjzheloe mashinostroenie [Heavy Engineering]. 2019. № 5-6. P. 60-63. (in Russian).
- [3] Abuzov A.V., Abuzov Ya.A. Avtomatizatsiya upravleniya pod"yemno-transportnymi mekhanizmami pri likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy [Automation of Control of Lifting and Transport Mechanisms in Emergency Response]. Inzenernyj vestnik Dona [Don Engineering News]. 2019. №7. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n7y2019/6104 (in Russian).
- [4] Kravchenko P. D., Fedorenko D.N., Kosogova Y.P. Variant konstruktivnogo ispolneniya ustroystva tochnogo pozitsionirovaniya zakhvata dlya pod"yema upavshikh kasset v reaktore tipa VVER [Design Version of The Device, Exact Positioning of the Gripper for Lifting the Fallen Cassettes in the Reactor of WWER Type]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2019. №1(30). P. 101-105 (in Russian).
- [5] Cov'yanov A.A., Kokorev YU.N., Hodakov D.V., Praliev D.A. Osobennosti termicheskoy obrabotki svarnykh soyedineniy krupnogabaritnykh agregatov pri montazhe AES [Features of Heat Treatment of Welded Joints of Large-Sized Units during NPP Installation]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding Production]. 2014. №11. P. 47-52 (in Russian).
- [6] Borincev A.B., Fedosov V.G. Vliyaniye tekhnologii izgotovleniya trubkov kryshki reaktora tipa VVER-1000 na napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye konstruksii pri ekspluatatsii

- [Influence of Manufacturing Technology for WWER-1000 Reactor Cover Pipes on the Stress-Strain State of the Structure during Operation]. Tyazheloe mashinostroenie [Heavy Engineering]. 2009. №1. P. 2-5 (in Russian).
- [7] Holopov A.A., Dudkevich K.A., Pergamenshchik B.K. Transportirovka i montazh ukрупnykh elementov AES [Transportation and Installation of the Integrated NPP Components]. Vestnik MGSU [MGSU Bulletin]. 2010. №4-2. P. 266-274 (in Russian).
- [8] Kravchenko P.D., Kosogova Yu.P., Godunov S.F., Antonova T.V., Leonov V.A. Raschetnoye obosnovaniye sposoba primeneniya s'yemnykh gruzozakhvatnykh ustroystv pri peremeshchenii ellipsoidnykh dnishch korpusnogo oborudovaniya AES [Calculation Justification of the Method of Using Removable Load-Lifting Devices when Moving Ellipsoid Bottoms of Nuclear Power Plant Hull Equipment]. Inzhenernyj vestnik Dona [Don Engineering News]. 2020. №1. URL: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_15_1_Kravchenko.pdf_37ffaf2207.pdf (in Russian).
- [9] Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. Spravochnik po soprotivleniyu materialov [Reference Book on the Resistance of Materials]. Kiev: Naukova dumka. 1988. 736 p. (in Russian).

A Variant of Application of Removable Lever for Turning Ellipsoid Bottoms of NPP Hull Equipment

P.D. Kravchenko ^{*1}, Y.P. Kosogova ^{**2}, M.A. Gashneva ^{***3}, A.F. Kovalev ^{****4}

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

^{**}branch of JSC AEM-technologies «Atomash» in Volgodonsk, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347388

^{***}AO «Volgoenergoremont», Zhukovskiy highway, 38, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347388

¹e-mail: krapa21@yandex.ru

ORCID iD: 0000-0003-3437-9998

WoS Researcher ID: G-5279-2017

²e-mail: ypkosogova@mephi.ru

ORCID iD: 0000-0003-3952-7814

WoS ResearcherID: Y-4338-2018

³e-mail: marinagashneva82@mail.ru

⁴e-mail: kovalevaea12@mail.ru

Abstract – The paper present the calculation of the strength and rigidity of the removable gripper for moving and turning ellipsoid bottoms of hull equipment. The proposed design solution will reduce the labor and material consumption of technological equipment and eliminate the need for welded load-handling and installation elements.

Keywords: removable hoisting device, tilting and displacement, the calculation of the strength, grip thickness.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.039.5

ЖИДКОСОЛЕВЫЕ РЕАКТОРЫ С ТЕПЛОМ И БЫСТРЫМ
СПЕКТРОМ ДЛЯ ТРАНСМУТАЦИИ МИНОРНЫХ АКТИНИДОВО. Ашраф^{***}, Г. В. Тихомиров^{*}

** Институт ядерной физики и технологий, Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

*** Кафедра физики, Факультет педагогического образования, университет Айн-Шамс, Каир, Египет*

Долгоживущие минорные актиниды (МА) ^{237}Np , ^{241}Am , ^{243}Am , ^{243}Cm , ^{244}Cm и ^{245}Cm ответственны за эффективную дозу и выделение тепла после непосредственного захоронения в глубоких геологических формациях. Таким образом, долгоживущие МА представляют собой основное бремя ядерной энергетики. Долгоживущие МА еще не использовались в качестве ядерного топлива. Следовательно, трансмутация этих МА предлагается в качестве альтернативы прямому окончательному захоронению. В данной работе мы анализируем и сравниваем эффективность трансмутации МА в критическом однофазном двухзонном ториевом реакторе (Single-fluid Double-zone Thorium-based Molten Salt Reactor – SD-TMSR) и маломощном жидкосолевым реакторе с быстрым спектром (Small Molten Salt Fast Reactor – SMSFR). Мы изучаем изменение $K_{\text{эфф}}$ и реактивности активной зоны с различными нагрузками МА, сдвигом спектра нейтронов, эволюцией во времени МА и запасов основных нуклидов, а также коэффициентом трансмутации (КТ). КТ долгоживущих МА рассчитывается с использованием кода Монте-Карло SERPENT-2. Полный поток нейтронов в SD-TMSR и SMSFR может достигать $4,1 \times 10^{14}$ и $1,8 \times 10^{15}$ н/см²с, соответственно. Результаты показывают, что SD-TMSR потребляет около 50% генерируемых изотопов Pu в топливной соли, однако, SMSFR потребляет около 86,5% генерируемых изотопов Pu. Во время выгорания мы применяем непрерывную переработку топливной композиции, поэтому активная зона остается критической, а общая масса топлива в активной зоне и в бланкете практически постоянна. Результаты показывают, что оба реактора эффективно трансмутируют ^{237}Np , ^{241}Am , ^{243}Am и ^{243}Cm , в то время как SMSFR имеет более высокий КТ, чем SD-TMSR. КТ общих МА достигает 54,84% и 87,97% в SD-TMSR и SMSFR, соответственно.

Ключевые слова: жидкосольевой реактор, трансмутация, непрерывная переработка, минорные актиниды, SERPENT, код Монте-Карло, SD-TMSR, коэффициентом трансмутации.

Поступила в редакцию 24.08.2020

После доработки 13.10.2020

Принята к печати 16.10.2020

Введение

Трансурановые элементы (ТРУ) накапливаются во время работы ядерных реакторов в ядерном топливе. Среди ТРУ долгоживущие минорные актиниды (МА) нептуний, америций и кюрий отвечают за эффективную дозу и выделение тепла после непосредственного захоронения в глубоких геологических формациях [1]. Поэтому долгоживущие МА представляют собой основное бремя ядерной энергетики. Отделенный от ТРУ плутоний может использоваться с ураном в качестве МОКС-топлива в энергетических реакторах [2]. Однако добавление МА в МОКС-топливо может повлиять на характеристики активной зоны в аварийных условиях. Долгоживущие МА еще не использовались в качестве ядерного топлива. Поэтому трансмутация этих МА предлагается в качестве альтернативы прямому захоронению. Трансмутация уменьшает количество долгоживущих МА, превращая их в

короткоживущие продукты деления (ПД) и/или в некоторые полезные ТРУ. Следовательно, трансмутация уменьшает объем, тепловыделение и радиотоксичность высокоактивных отходов при длительном хранении.

В ранее опубликованных работах исследовалась трансмутация МА в различных типах ядерных реакторов, включая как тепловые, так и быстрые реакторы. Сечения долгоживущих МА в области тепловых нейтронов значительно выше, чем в области быстрых нейтронов. Кроме того, ^{237}Np , ^{241}Am и ^{243}Am имеют очень высокие сечения захвата нейтронов в тепловой области. Таким образом, эти долгоживущие МА могут захватывать тепловые нейтроны и превращаться в ^{239}Pu , $^{242\text{m}}\text{Am}$, ^{243}Cm и ^{245}Cm , которые имеют очень высокие сечения деления. Следовательно, тепловые реакторы могут эффективно трансмутировать МА [3]. Реакторы на быстрых нейтронах имеют высокий поток нейтронов, большое отношение сечений к захвату и отрицательное потребление нейтронов. Таким образом, они признаны в качестве альтернативных систем для трансмутации МА [4]. Однако многие быстрые реакторы сталкиваются со многими проблемами, включая безопасность, экономичность и конструкционные материалы. Например, в жидкометаллических быстрых реакторах использование жидкометаллического теплоносителя (например, Na, Pb, Pb-Bi и т.д.) представляет проблему из-за сильной коррозии окружающей среды. В газоохлаждаемых быстрых реакторах, высокие температуры могут сократить срок службы материала. Для быстрых подкритических реакторов стабильная работа требует надежной ускорительной технологии.

Значительный интерес направлен на топливный цикл $\text{Th}/^{233}\text{U}$, поскольку Th порождает небольшое количество ТРУ [1]. Жидкосольевой реактор (ЖСР) предназначен для работы на основе топливного цикла $\text{Th}/^{233}\text{U}$. Международный Форум реакторов «Поколение IV» (Generation IV International Forum – GIF) выбрал ЖСР для дальнейшего изучения и исследования [5]. ЖСР имеет много преимуществ, которые согласуются с технологическими целями GIF, такими как: собственная безопасность, жидкое топливо, непрерывная переработка топливной композиции, отличная экономия нейтронов и работа при давлении, близком к окружающему, в первичном контуре. Уникальные характеристики систем ЖСР делают их очень перспективными для целей трансмутации. Одной из ключевых особенностей ЖСР является жидкое топливо, то есть нет необходимости изготавливать топливные элементы, содержащие актиниды высокого уровня. Более того, в системах ЖСР применяются технологии непрерывной переработки топливной композиции с возможностью добавления нуклидов в топливо и выведения их из него, что приводит к потреблению МА с высокой степенью выгорания и минимальной обработкой.

Основная цель настоящей работы заключается в анализе и сравнении характеристик трансмутации МА в критическом однофазном двухзонном ториевом реакторе (Single-fluid Double-zone Thorium-based Molten Salt Reactor – SD-TMSR) и маломощном жидкосольевом реакторе с быстрым спектром (Small Molten Salt Fast Reactor – SMSFR). Мы изучаем изменение $K_{\text{эфф}}$ и реактивности активной зоны с различными нагрузками МА, сдвигом спектра нейтронов, эволюцией во времени МА и запасов основных нуклидов, а также коэффициентом трансмутации (КТ).

SD-TMSR представляет собой ЖСР с тепловым спектром и графитом в качестве замедлителя, работающий в топливном цикле $\text{Th}/^{233}\text{U}$. Напротив, SMSFR – это ЖСР быстрого спектра без замедлителя, который имеет конфигурацию активной зоны, аналогичную MSFR, но с меньшим объемом активной зоны. SMSFR также предназначен для работы на основе топливного цикла $\text{Th}/^{233}\text{U}$.

Мы используем SERPENT-2 [6] для выполнения всех расчетов, представленных в этой статье. Мы применяем процедуру выгорания ЖСР, включенную в SERPENT-2, для моделирования непрерывной переработки топливной композиции.

Описание моделей SD-TMSR и SMSFR

Геометрия SD-TMSR и состав топлива

В 2018 г. академия наук Китая представила проект SD-TMSR [7]. Структура активной зоны SD-TMSR основана на жидкосольевом реакторе-размножителе (Molten Salt Breeder Reactor – MSBR) [8] и TMSR [9]. На рисунке 1 показана общая конфигурация SD-TMSR.

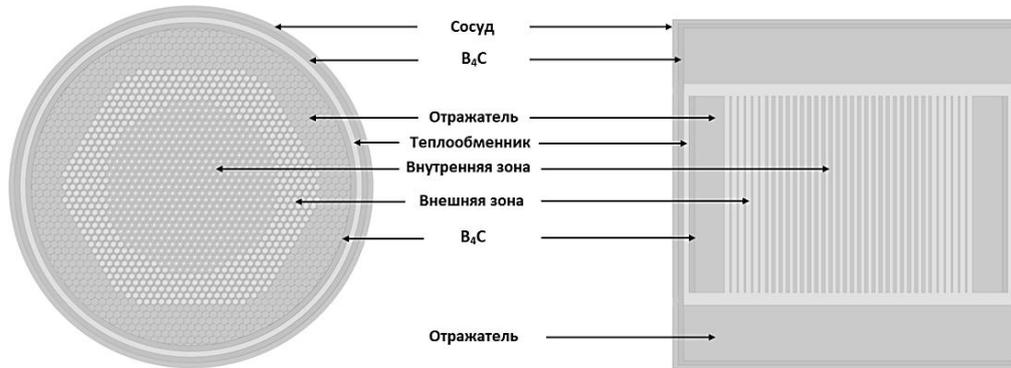


Рисунок 1 – модель SD-TMSR [SD-TMSR model]

Активная зона SD-TMSR представляет собой правый цилиндр (с диаметром и высотой, равным 460 см), разделенный на внешнюю зону (522 топливных трубки) и внутреннюю зону (486 топливных трубок) для повышения коэффициента воспроизводства. Графитовые шестиугольные призмы с длиной стороны 7,5 см заполняют активную зону. Жидкое топливо непрерывно циркулирует через топливные каналы, которые пронизывают гексагональные призмы графита. Как радиальные, так и осевые отражатели окружают активную зону, чтобы уменьшить утечку нейтронов. Толщина радиального отражателя составляет 50 см, а высота осевого отражателя составляет 130 см. Цилиндр В₄С толщиной 10 см окружает отражатели для экранирования. Внешний сосуд SD-TMSR представляет собой сплав на основе никеля толщиной 10 см (Hastelloy N), в котором находятся графитовые элементы, топливная соль, отражатель, цилиндр В₄С и промежуточный теплообменник. Основные характеристики SD-TMSR приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики SD-TMSR [11] и SMSFR [12] [Main characteristics of SD-TMSR and SMSFR]

Параметры	SD-TMSR	SMSFR
Тепловая мощность (МВт)	2250	500
Состав топлива (моль %)	70LiF-17,5BeF ₂ -12,5HMF ₄	77,5LiF-22,5(HM)F _N
Обогащение ⁷ Li (%)	99,995	99,995
Температура топлива (К)	900	1023
Плотность топлива (г/см ³)	3,3	4,1
Коэффициент расширения топлива (г/(см ³ ·К))	-6,7×10 ⁻⁴	-8,82×10 ⁻⁴
Плотность графита (г/см ³)	2,3	2,3
Плотность В ₄ С (г/см ³)	2,54	2,54
Обогащение ¹⁰ B (%)	18,4	18,4
Диаметр/высота активной зоны (см)	460/460	124/124
Длина стороны гексагональной графитовой сборки (см)	7,5	
Внутренний радиус (см)	3,5	
Внешний радиус (см)	5	
Соотношение расплавленной соли и графита во внутренней подзоне	0,357	
Соотношение соли расплава и графита во внешней подзоне	1,162	
Объем топлива (м ³)	52,9	3,0

Состав топливной соли представляет собой $\text{LiF-BeF}_2\text{-(HM)F}_N$ (70-17,5-12,5 мол.%), где HM – тяжелый металл (т.е. ^{232}Th , ^{233}U и долгоживущие МА), и N зависит от выбранного тяжелого металла и термохимическое состояние соли жидкого топлива. Состав долгоживущих МА взят из состава отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) коммерческого реактора с водой под давлением (Pressurized Water Reactor – PWR) со средним выгоранием разряда 33 ГВт-сут./тU и после 3 лет охлаждения. Весовые доли долгоживущих МА (мас.%) приведены в таблице 2 [10]. Объем и плотность топливной соли составляют $52,9 \text{ м}^3$ и $3,3 \text{ г/см}^3$, соответственно.

Таблица 2 – Весовые доли долгоживущих МА (мас.%) [Weight fractions of long-lived MA]

^{237}Np	^{241}Am	^{243}Am	^{243}Cm	^{244}Cm	^{245}Cm
56,2	26,4	12	0,03	5,11	0,26

Геометрия SMSFR и состав топлива

На рисунке 2 показана общая конфигурация SMSFR. Активная зона SMSFR представляет собой правый цилиндр (диаметр и высота которого равен 124 см), заполненный топливной солью.

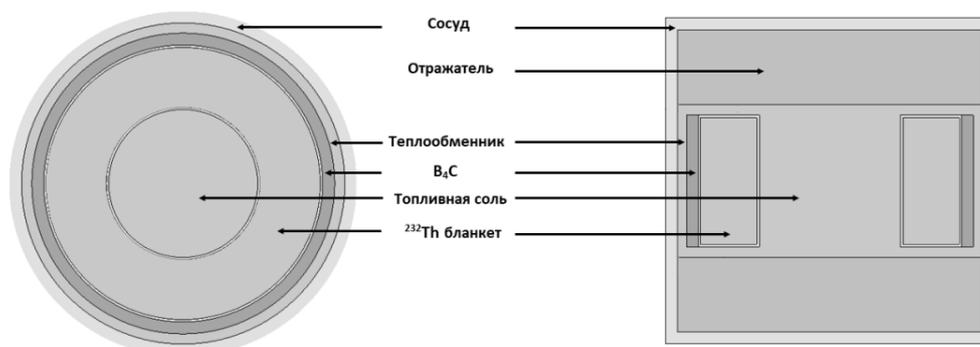


Рисунок 2 – Модель SMSFR [SMSFR model]

Радиальный бланкет толщиной 50 см, заполненный ^{232}Th , окружает активную зону, чтобы улучшить коэффициент воспроизводства. Торийевой бланкет окружен цилиндром B_4C толщиной 10 см для экранирования. Осевой отражатель высотой 60 см окружает активную зону, чтобы уменьшить утечку нейтронов. Наконец, сосуд толщиной 10 см вмещает все компоненты SMSFR. Отражатель и сосуд изготовлены из Hastelloy N. Основные характеристики SMSFR обобщены в таблице 1. Состав топливной соли LiF-(HM)F_N (77,5-22,5% мол.). HM – это ^{232}Th , ^{233}U и долгоживущие МА. Весовые доли долгоживущих МА (мас.%) приведены в таблице 2. Объем и плотность топливной соли составляют 3 м^3 и $4,1 \text{ г/см}^3$ соответственно.

Методология и инструменты

В данной работе SERPENT-2 моделирует 3D-модель реактора SD-TMSR и SMSFR с различными начальными массовыми нагрузками. Для всех расчетов в настоящей работе мы использовали библиотеку сечений ENDF/B-VII. Результаты расчетов соответствуют работе реактора и были получены при моделировании 25000 нейтронов за цикл, 50 неактивных и 500 активных циклов (т.е. $12,5 \times 10^6$ активных нейтронных траекторий за цикл). Каждый шаг пропускал 50 неактивных циклов перед началом активных подсчетов, чтобы обеспечить сходимость распределения источников деления. Сходимость проверена по энтропии источника деления. Время полного выгорания SD-TMSR и SMSFR составляло 40 лет со статистической погрешностью в $K_{\text{эфф}} \pm 36$ рсм. В данной работе мы анализируем конечную область. Процедура выгорания MSR, предоставленная кодом SERPENT-2, моделирует непрерывную

переработку топливной композиции. Процедура MSR более подробно описана в наших предыдущих работах [11, 13]. На этапе выгорания активная зона поддерживалась критическим ($K_{эфф} \approx 1,003$), а общая масса топлива в активной зоне и в бланкете была почти постоянной ($dm = 0,1\%$). Дрейф запаздывающих нейтронов в данной работе не рассматривается.

Рисунок 3 демонстрирует блок-схему этапов расчета. Код SERPENT решает уравнение Бейтмена с помощью расширенного матричного экспоненциального решения на основе метода рационального приближения Чебышева. Затем система извлекает газообразные продукты деления (ПД) и нерастворенные металлы в течение 30 с помощью системы барботирования газа. Другие ПД (лантаноиды и растворимые металлы) и Pa удаляются путем химической переработки с соответствующей скоростью удаления.

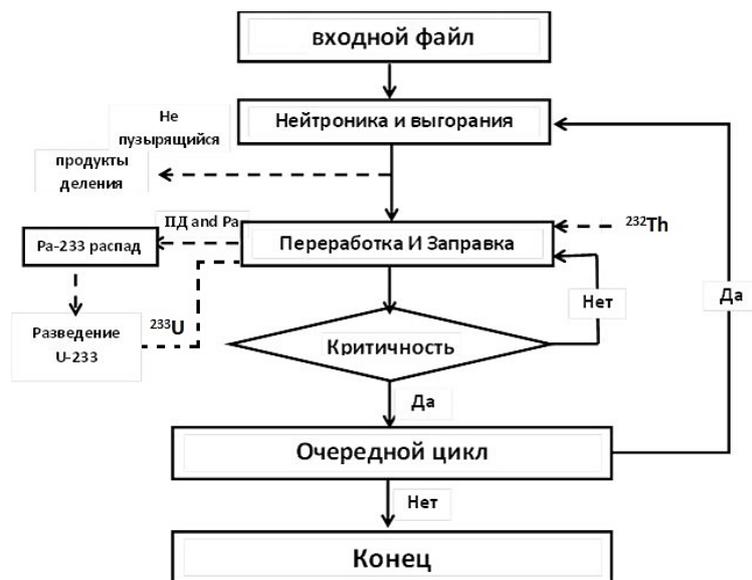


Рисунок 3 – Блок-схема процедур расчета [Flow chart of calculation procedures]

Извлечение ПД может быть смоделировано путем установки массового расхода этих элементов из активной зоны в *ПД-бак*. Pa извлекается из активной зоны с подходящей скоростью потока в *Pa-бак* для распада ($\tau_{1/2} = 27$ сут.) и получения ^{233}U . ^{233}U перенаправляется в активную зону в качестве свежего делящегося материала, а остальное составляет чистая выработка ^{233}U . Перегрузка ^{232}Th из внешнего запаса и ^{233}U из *Pa-бака* поддерживает критичность активной зоны во время выгорания.

Пусть ЖСР извлекает dN_e количество конкретного элемента e в течение времени dt , таким образом [9], формула (1):

$$dN_e = N_e \frac{dt}{T_r} \varepsilon_e, \quad (1)$$

где, T_r – это время, в течение которого вся соль подвергается повторной переработке; ε_e – эффективность извлечения.

Интегрируя уравнение 1, получим новый параметр, который называется константой удаления $\lambda_e = \frac{\varepsilon_e}{T_r}$. Для простоты, будем считать ε_e равным 100%, поэтому λ_e обратно пропорциональна T_r . Параметры переработки для SD-TMSR и SMSFR точно рассчитаны и обобщены в таблице 3. Для SD-TMSR мы приняли 10,59 сут. ($\lambda_e = -1.09 \times 10^{-6} \text{ c}^{-1}$) в качестве времени обработки для растворимых ПД и Pa [9]. Однако для SMSFR время обработки было установлено равным 180 сут. ($\lambda_e = -6.43 \times 10^{-8} \text{ c}^{-1}$) [12].

Таблица 3 – Таблица обработки для SD-TMSR и SMSFR [Processing table for SD-TMSR and SMSFR]

Перерабатывающая группа	Элементы	Время обработки		константа удаления $\lambda_r [s^{-1}]$	
		SD-TMSR	SMSFR	SD-TMSR	SMSFR
ПД и нерастворенные металлы	H, He, N, O, Ne, Ar, Kr, Nb, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, Sb, Te, Xe, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, and Rn.	30 с	30 с	-3.33E-02	-3.33E-02
Извлечение лантаноидов и других растворимых ПД путем химической переработки	Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Cd, In, Sn, I, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, and Yb.	10.59 сут.	180 сут.	-1.09E-06	-6.43E-08
Извлечение Pa путем химической переработки	Pa	10.59 сут.	180 сут.	-1.09E-06	-6.43E-08

Результаты и выводы

Нагрузка МА

Концентрация тяжелого металла (НМ) в исходной топливной соли составляет 12,5 и 22,5 мол. % для SD-TMSR и SMSFR соответственно (см. табл. 1). НМ состоит из ^{232}Th , ^{233}U и долгоживущих МА. Концентрация ^{233}U в топливной соли поддерживается постоянной и равной 0,6 и 5,2 мол. % для SD-TMSR и SMSFR соответственно, чтобы получить максимально допустимую избыточную реактивность при загрузке МА = 0 т (без загрузок МА). Затем загрузка МА увеличивается с 0 до 5,82 т за счет инвентаря ^{232}Th . Рисунок 4 иллюстрирует изменение $K_{эфф}$ с нагрузками МА при фиксированной концентрации ^{233}U .

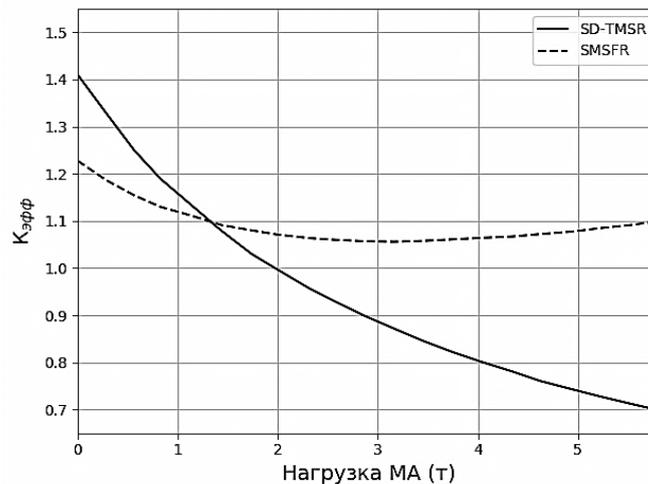


Рисунок 4 – Изменение эффективного коэффициента размножения с нагрузками МА при фиксированной концентрации ^{233}U для SD-TMSR и SMSFR (статистическая погрешность в $K_{эфф} \approx 36$ pcm), моделирование без выгорания [Change in effective multiplication factor with MA loads at a fixed concentration of ^{233}U for SD-TMSR and SMSFR (statistical error in $K_{эфф} \approx 36$ pcm), simulation without burnout]

Для SD-TMSR $K_{эфф}$ уменьшается с увеличением загрузок МА и достигает $\approx 0,69$ при максимальной загрузке МА (то есть 5,82 т). Однако, для SMSFR $K_{эфф}$ уменьшается до минимального значения при загрузке МА 3,15 т, затем снова увеличивается и достигает 1,1 при максимальной загрузке МА. Долгоживущие МА имеют большое количество поглотителей тепловых нейтронов, поэтому $K_{эфф}$ уменьшается с увеличением нагрузок МА. Кроме того, увеличение загрузки МА приводит к жесткости нейтронного спектра, как показано на рисунках 5 и 6. Следовательно, повышение загрузки МА уменьшает среднее микроскопическое сечение ^{233}U , что приводит к

уменьшению $K_{эфф}$, как это видно для SD-TMSR и SMSFR (см. рис. 4). Кроме того, жесткость нейтронного спектра (в результате увеличения загрузки МА) увеличивает среднее макроскопическое сечение деления самих МА, что приводит к увеличению $K_{эфф}$. Для SMSFR этот эффект становится значительным при высоких нагрузках МА. Увеличение $K_{эфф}$ от МА превышает уменьшение $K_{эфф}$ от ^{233}U , и $K_{эфф}$ снова увеличивается при высоких нагрузках МА (3,15 т, см. рис. 4). Этот результат согласуется с ранее опубликованным результатом [12] для аналогичного SMSFR и рассчитывается по SCALE и MCNP. На рисунках 5 и 6 показан нормализованный спектр нейтронного потока для SD-TMSR и SMSFR с различными нагрузками МА (от 0 до 5,82 т). Увеличение МА нагрузок ужесточает нейтронный спектр в обоих реакторах. Для SD-TMSR (рис. 5) жесткость нейтронного спектра, возникающая в результате увеличения инвентарной загрузки МА, обусловлена более близкой энергией поглощения резонансного захвата МА к пику тепловой энергии по сравнению с ^{232}Th , что приводит к поглощению большего количества тепловых нейтронов. Для SMSFR (рис. 6) увеличение нагрузки МА приводит к поглощению большего количества нейтронов в области резонансного захвата. Следовательно, нейтронный спектр ужесточает с увеличением МА нагрузок, как показано на рисунке 6.

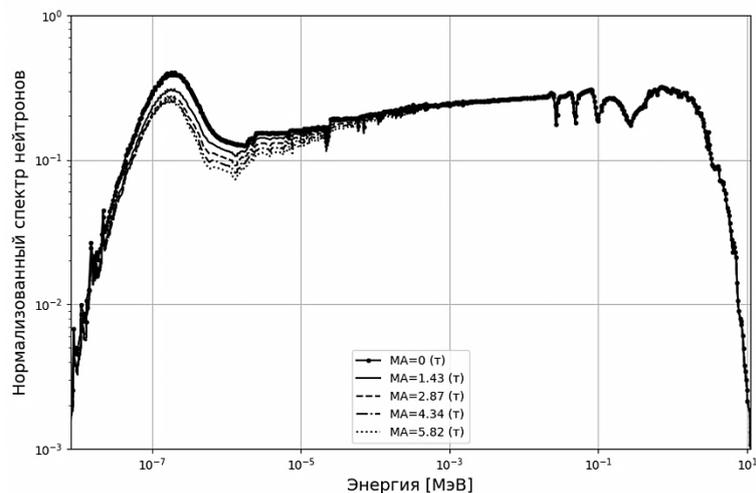


Рисунок 5 – Энергетический спектр нейтронного потока при различных нагрузках МА для SD-TMSR (моделирование без выгорания) [Energy spectrum of neutron flux at various MA loads for SD-TMSR (non-burnup simulation)]

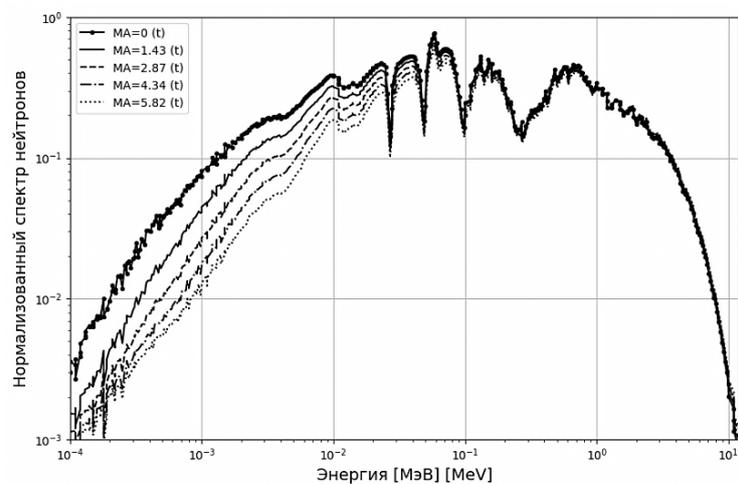


Рисунок 6 – Энергетический спектр нейтронного потока при различных нагрузках МА для SMSFR (моделирование без выгорания) [Energy spectrum of neutron flux at various MA loads for SMSFR (simulated without burnup)]

Начальный запас ^{233}U , необходимый для критичности ($K_{\text{эфф}} \approx 1.003$) как функция нагрузок МА для SD-TMSR и SMSFR, представлен на рисунке 7. Для SD-TMSR начальный запас ^{233}U возрастает линейно с нагрузками МА и достигает около 7,79 т для максимальной нагрузки МА. Однако, для SMSFR начальный запас ^{233}U возрастает до максимального значения при загрузке МА = 3,15 т, затем он снова уменьшается и достигает около 1,38 т для максимальной загрузки МА. Начальный запас ^{233}U , необходимый для критичности, коррелирует с изменением $K_{\text{эфф}}$, записанным на рисунке 4.

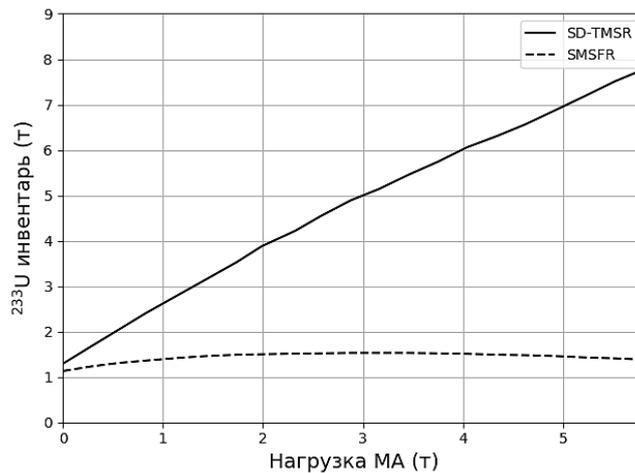


Рисунок 7 – Начальный инвентарь ^{233}U , необходимая для критичности ($K_{\text{эфф}} \approx 1.003$), как функция нагрузок МА для SD-TMSR и SMSFR (моделирование без выгорания) [Initial inventory of ^{233}U required for criticality ($K_{\text{эфф}} \approx 1.003$) as a function of MA loads for SD-TMSR and SMSFR (simulation without burnup)]

На рисунке 8 показано изменение $K_{\text{эфф}}$ во время выгорания при различных нагрузках МА для SD-TMSR и SMSFR соответственно.

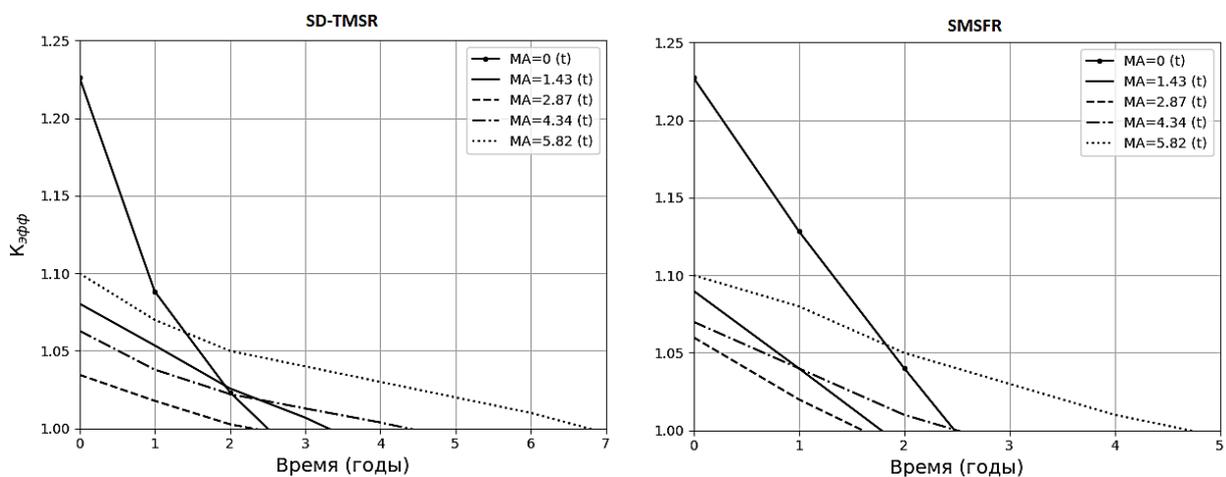


Рисунок 8 – Изменение эффективного коэффициента размножения во время выгорания при различных нагрузках МА для SD-TMSR и SMSFR (статистическая погрешность в $K_{\text{эфф}} \approx 36$ pcm, моделирование без непрерывной переработки топливной композиции) [Change in effective multiplication factor during burnup under different MA loads for SD-TMSR and SMSFR (statistical error in $K_{\text{эфф}} \approx 36$ pcm, simulation without online processing and refueling)]

$K_{\text{эфф}}$ уменьшается в результате выгорания исходных делящихся материалов и производства ядовитых продуктов деления (непрерывная переработка не применяются). Количество ^{233}U , генерируемого из ^{232}Th в SD-TMSR и SMSFR, недостаточно для поддержания критичности и противодействия паразитному поглощению нейтронов. Таким образом, оба реактора относительно быстро становятся подкритическими для разных нагрузок МА. При максимальной загрузке МА

(МА = 5,82 т) оба реактора становятся подкритическими при значительно более позднем времени работы, чем при других нагрузках МА, поскольку спектр нейтронов при высоких нагрузках МА ужесточает; больше ^{232}Th преобразуется в ^{233}U . Кроме того, при относительно высоких нагрузках МА положительная реактивность от делящихся МА (например, ^{239}Pu , ^{238}Np , ^{242}Am и ^{244}Am) снижает начальные потери реактивности (из-за выгорания исходных делящихся материалов). Следовательно, более высокие нагрузки МА поддерживают углубление выгорания и улучшают возможности трансмутации МА, как показано на рисунке 8.

Трансмутация МА

При загрузке МА = 5,82 т (см. рис. 8), можно получить относительно большое время работы как для SD-TMSR, так и для SMSFR. Кроме того, соответствующая начальная избыточная реактивность является относительно низкой и может быть компенсирована применением непрерывной переработки топливной композиции. Как длительное время работы, так и низкая начальная избыточная реактивность необходимы для углубления выгорания и контроля ЖСР.

Долгоживущие МА могут быть трансмутированы двумя различными способами в активной зоне реактора. Первый способ заключается в поглощении нейтронов, а затем в процессе деления с образованием короткоживущих ПД или стабильных нуклидов. Второй способ – захват нейтронов и превращение их в новые высокорadioактивные изотопы ТРУ. Цель трансмутации достигается после того, как долгоживущие радиоактивные МА становятся стабильными нуклидами, короткоживущими ПД или полезными радиоактивными изотопами (т.е. имеют практическое применение). Целью настоящего исследования является вычисление и сравнение коэффициента трансмутации как в SD-TMSFR, так и в SMSFR. В критических условиях наши расчеты показывают, что полный нейтронный поток в SD-TMSR и SMSFR может достигать $4,1 \times 10^{14}$ и $1,8 \times 10^{15}$ н/см²с соответственно.

Для анализа возможности трансмутации МА мы приняли два случая: МА = 0 т и МА = 5,82 т, что соответствует минимальной и максимальной нагрузкам МА. Во время выгорания мы применили непрерывную-схему переработки топливной композиции, описанную в разделе методологии и инструментов. Мы непрерывно извлекали ^{233}Pa и удаляли ПД из топливной соли и добавляли ^{232}Th и ^{233}U .

На рисунках 9 и 10 показана эволюция запасов важных нуклидов при нагрузке Ма = 0 т (сплошная линия) и нагрузке Ма = 5,82 т (пунктирная линия) для SD-TMSR и SMSFR соответственно.

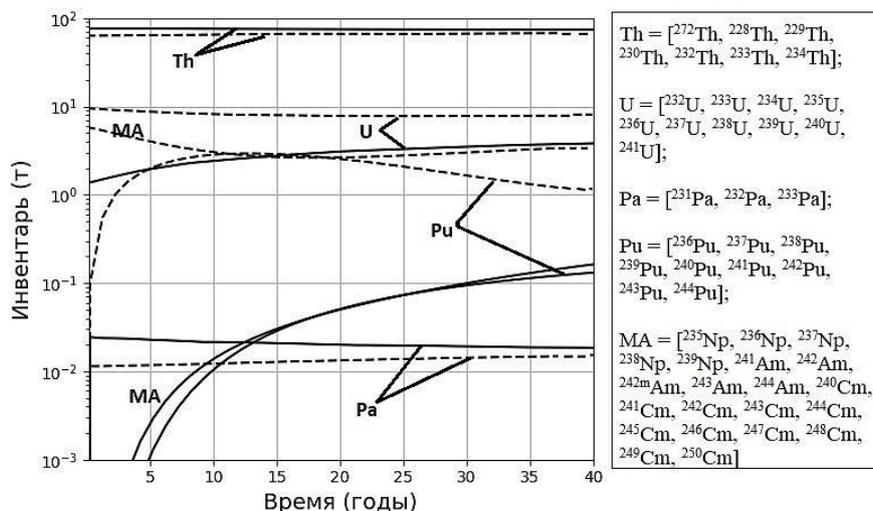


Рисунок 9 – Эволюция важных нуклидов и запасов МА при МА = 0 т (сплошная линия) и МА = 5,82 т (пунктирная линия) для SD-TMSR при непрерывной переработке (10,59 сут.) (МА включает Np, Am, Cm) [Evolution of important nuclides and MA stocks at MA = 0 t (solid line) and MA = 5.82 t (dashed line) for SD-TMSR during online processing (10.59 days) (MA includes Np, Am, Cm)]

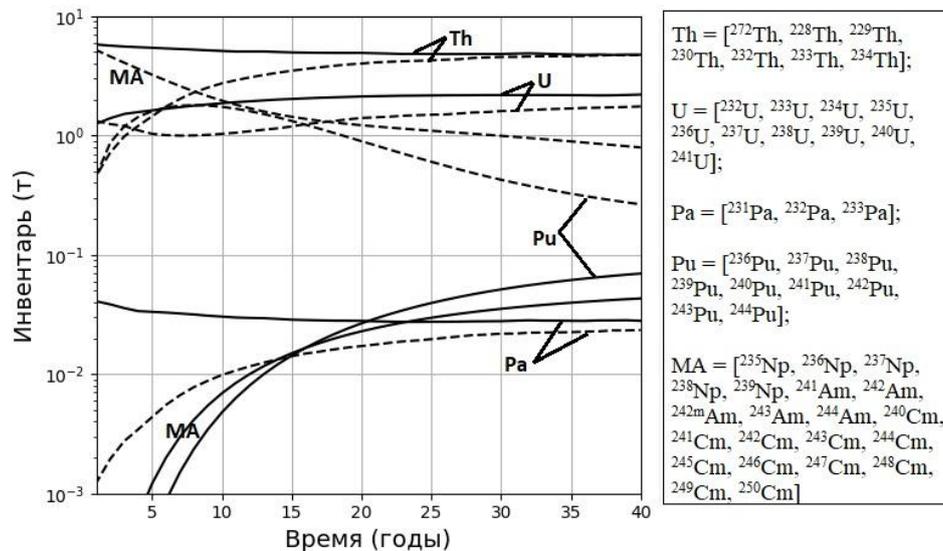


Рисунок 10 – Эволюция важных нуклидов и запасов МА при МА = 0 т (сплошная линия) и МА = 5,82 т (пунктирная линия) для SMSFR при непрерывной переработке (180 сут.) (МА включает Np, Am, Cm) [Evolution of important nuclides and MA stocks at MA = 0 t (solid line) and MA = 5.82 t (dashed line) for SMSFR during online processing (180 days) (MA includes Np, Am, Cm)]

Для SD-TMSR при МА = 0 т (сплошная линия) масса протактиния в топливной соли уменьшается незначительно и достигает 18,3 кг в конце рабочего времени. Кроме того, Th и U образуют относительно небольшие количества МА (Np, Am и Cm) и Pu во время выгорания. Масса МА и Pu увеличивается со временем выгорания. Уровень Pu в топливной соли коррелирует с массой МА; однако для достижения равновесия МА потребуется больше времени, чем для Pu. Запас U увеличивается во время работы и достигает равновесия через ≈ 20 лет. На рисунке 9 показано, что перегрузка активной зоны Th помогает поддерживать почти постоянный запас тяжелых материалов в течение всего времени эксплуатации. При загрузке МА = 5,82 т (пунктирная линия) запасы Th и Pa незначительно увеличиваются во время работы. Запасы Th и Pa достигают около 67,9 т и 15,9 кг в конце рабочего времени. Масса Pu увеличивается в течение первых 15 лет эксплуатации (из-за захвата нейтронов в Np и Am), а затем уменьшается и достигает примерно 1 т в конце рабочего времени. Около 50% образующихся изотопов Pu в топливе потребляется за последние 25 лет эксплуатации. Это указывает на то, что мы можем сжигать изотопы Pu, которые генерируются во время трансмутации МА SD-TMSR. Запас U немного уменьшается со временем и достигает 7,5 т в конце рабочего времени. Запас МА уменьшается до минимального значения через 20 лет эксплуатации, затем он снова увеличивается и достигает 3,3 т в конце рабочего времени.

На рисунке 11 показано изменение во времени общего запаса МА, Np, Am и Cm за 40 лет выгорания для SD-TMSR и SMSFR, когда общая начальная загрузка МА = 5,82 т. Как показано на рис. 11, для SD-TMSR уменьшение запасов МА в течение первых 20 лет эксплуатации из-за трансмутации изотопов Np и Am. Увеличение запаса МА после 20 лет эксплуатации происходит главным образом из-за накопления изотопов Cm (в основном ^{244}Cm и ^{245}Cm) в результате последовательностей захвата нейтронов и бета-распада в изотопах Am и Pu. Изотопы с нечетной массой Cm могут использоваться в тепловых реакторах благодаря их относительно высокому сечению деления в области тепловой энергии. Однако их небольшие доли запаздывающих нейтронов могут повлиять на управление тепловым реактором.

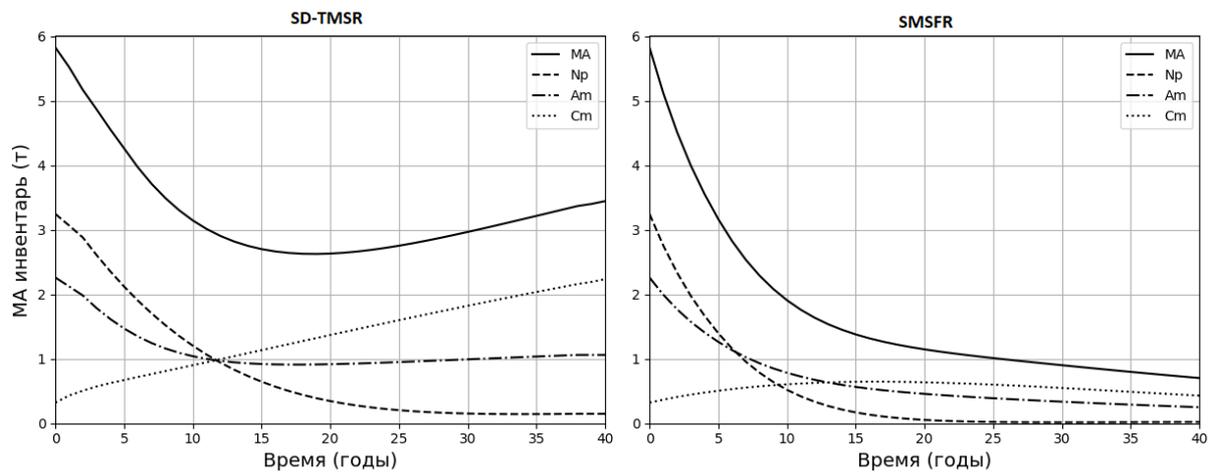


Рисунок 11 – Эволюция общего запаса MA, Np, Am и Cm за 40 лет выгорания для SD-TMSR и SMSFR (общий начальный MA = 5,82 т) [Evolution of total stock of MA, Np, Am and Cm over 40 years of burnup for SD-TMSR and SMSFR (total initial MA = 5.82 t)]

Для SMSFR (см. рис. 10) при загрузке MA = 0 т (сплошная линия) запасы Pa, MA, Pu, U и Th изменяются так же, как в SD-TMSR, но с меньшим количеством. Масса Pa, MA, Pu, U и Th достигает 29 кг, 43 кг, 72 кг, 2,2 т и 4,7 т, соответственно в конце рабочего времени. Инвентарь U достигает равновесия через 20 лет. При нагрузке MA = 5,82 т (пунктирная линия) запасы Th и Pa увеличиваются в процессе эксплуатации. Запасы Th и Pa достигают около 4,7 т и 23,3 кг в конце рабочего времени. Масса Pu увеличивается в течение первых 8 лет эксплуатации из-за захвата нейтронов в Np и Am, а затем уменьшается (по мере превращения большого количества MA) и достигает примерно 270 кг в конце времени работы.

Около 86,5% образующихся изотопов Pu в топливе потребляется за последние 30 лет эксплуатации. Это указывает на то, что SMSFR может эффективно сжигать изотопы Pu, которые генерируются во время трансмутации MA. Запас U уменьшается со временем эксплуатации, а затем увеличивается через 8 лет и достигает 1,76 т в конце срока эксплуатации. Запас U (в основном ^{233}U) сильно связан с реактивностью от MA и произведенного Pu. При максимальной загрузке MA (MA = 5,82 т) масса Pu увеличивается в течение первых 8 лет эксплуатации из-за захвата нейтронов в Np и Am, а затем уменьшается по мере превращения большого количества MA. Положительная реактивность от MA и его генерирующего Pu уменьшает начальные потери реактивности. Поэтому для поддержания критичности SMSFR требуется лишь небольшое количество подачи ^{233}U в течение первых 8 лет. Подача ^{233}U увеличивается в течение оставшихся 32 лет, чтобы противодействовать выгоранию Pu. Запас MA уменьшается со временем работы и достигает около 700 кг в конце времени работы.

Как показано на рисунке 11, для SMSFR – резкое уменьшение общего запаса MA из-за трансмутации изотопов Np и Am путем деления и захвата. SMSFR – это ЖСР с быстрым спектром, поэтому трансмутация MA может происходить напрямую из-за высокого потока нейтронов. Что касается трансмутации Cm, то после 18 лет эксплуатации потребление изотопов Cm (в основном ^{244}Cm и ^{245}Cm) больше, чем накопление его из изотопов Am и Pu. ^{244}Cm имеет период полураспада 18,1 года и может распадаться в двух режимах: спонтанное деление и α -режим. Таким образом, общий запас Cm уменьшается после 18 лет эксплуатации и достигает примерно 430 кг в конце рабочего времени, как показано на рисунке 11 для SMSFR.

Мы подсчитали коэффициент трансмутации (КТ) всех MA, ^{237}Np , ^{241}Am , ^{243}Am , ^{243}Cm , ^{244}Cm и ^{245}Cm для SD-TMSR и SMSFR во время выгорания. КТ (%) рассчитывается по следующей формуле (2) [12]:

$$KT_{(t)} = \left(1 - \frac{M_{(t)}}{M_{(НВ)}}\right) \times 100, \quad (2)$$

где, $KT_{(t)}$ – коэффициент трансмутации МА (%) во время работы t ;

$M_{(t)}$ – инвентарь МА во время работы t ;

$M_{(НВ)}$ – инвентарь МА в начале выгорания.

На рисунке 12 показан KT (%) от общего МА, рассчитанного по формуле (2) за 40 лет выгорания для SD-TMSR и SMSFR. Для SD-TMSR KT общей МА увеличивается в течение первых 20 лет эксплуатации и достигает 54,84%, затем он уменьшается в течение оставшихся 20 лет и составляет 40,96%. Снижение KT после 20 лет эксплуатации связано с накоплением изотопов ^{244}Cm и ^{245}Cm (см. рис. 11). ^{244}Cm может распадаться в двух режимах: режим спонтанного деления для создания короткоживущих ПД и α -режим для производства ^{240}Pu . Затем ^{240}Pu захватывает нейтрон и производит ^{241}Pu с $\tau_{1/2} = 14$ лет. ^{245}Cm существует в МА с очень малой долей около 0,26%, в то время как он имеет относительно большой период полураспада (8500 лет). Кюрий является основным источником нейтронов и тепла от радиоактивного распада. Таким образом, для SD-TMSR начальные загрузки МА должны содержать мало или не содержать изотопа кюрия. Непрерывное извлечение изотопов Cm может повысить KT в SD-TMSR; однако, требуется специальное хранилище, так как Cm эффективно способствует теплоте распада отходов. Выключение SD-TMSR после 20 лет эксплуатации является еще одним сценарием, позволяющим избежать нежелательного накопления изотопов Cm. За 20 лет работы SD-TMSR достигает максимального значения KT и превращает около 3,2 т из 5,82 т МА в Pu, короткоживущие ПД и стабильные нуклиды.

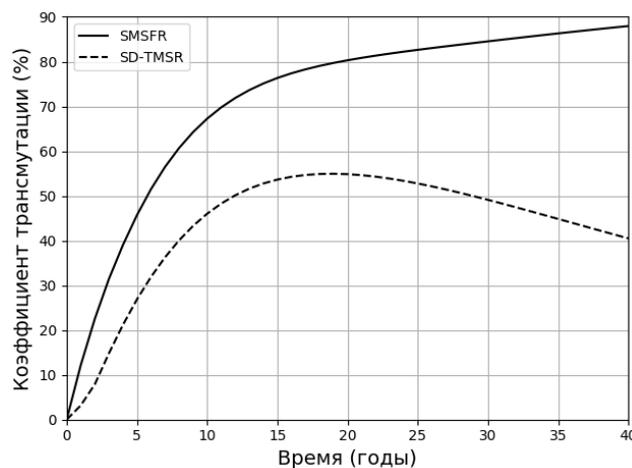


Рисунок 12 – Коэффициент трансмутации (%) в течение 40 лет выгорания для SD-TMSR и SMSFR, соответственно [Transmutation rate (%) over 40 years burnup for SD-TMSR and SMSFR, respectively]

Для SMSFR KT увеличивается с выгоранием и достигает около 87,97% после 40 лет эксплуатации. Здесь относительно высокий коэффициент трансмутации обусловлен высоким нейтронным потоком в SMSFR по сравнению с SD-TMSR.

Верификация с другими кодами

Верификация нейтронного расчета SD-TMSR была дана в нашей опубликованной статье [11]. Полученные результаты были сопоставлены с Ли и др. [7]. Ли и его коллеги использовали собственный инструмент MSR-RS на основе SCALE 6.1 и применили его к SD-TMSR. Однако мы приняли процедуру выгорания ЖСП, включенную в SERPENT-2, для моделирования непрерывной оперативной переработки и дозагрузки одного и того же реактора (то есть SD-TMSR). Оба метода применяли один и тот же период переработки, а именно: извлечение газообразных ПД и нерастворенных

металлов за 30 с и удаление растворимых ПД и Ра в течение 10,59 сут. (то есть $5 \text{ м}^3/\text{сут.}$). Кроме того, оба метода извлекали ^{233}Pa из активной зоны и повторно вводили полученный ^{233}U в активную зону для критичности как можно скорее. Существует хорошее согласие между характеристиками топлива и параметрами безопасности, полученными каждым методом (более подробно см. [11]). Для SMSFR результаты настоящей работы были сопоставлены с ранее опубликованными результатами [12] для аналогичного SMSFR и рассчитаны по SCALE и MCNP. Например, максимальное отклонение в начальном $K_{\text{эфф}}$ (при МА = 0 т) оказалось <1% [12].

Заключение

Коэффициент трансмутации долгоживущих МА, включая ^{237}Np , ^{241}Am , ^{243}Am , ^{243}Cm , ^{244}Cm и ^{245}Cm , был рассчитан с использованием кода SERPENT-2 Monte-Carlo для 3D-модели SD-TMSR и SMSFR. Мы изучили влияние добавления долгоживущих МА на $K_{\text{эфф}}$, реактивность активной зоны и спектр нейтронов в SD-TMSR и SMSFR. При максимальной загрузке МА реакторы становятся подкритическими при значительно более позднем времени работы, чем при других нагрузках МА, поскольку спектр нейтронов при высоких нагрузках МА стал жестким. Высокие нагрузки МА поддерживают углубление выгорания и улучшают возможности трансмутации МА. Временная эволюция запасов важных нуклидов при МА = 0 т и 5,82 т была проанализирована для SD-TMSR и SMSFR соответственно. При МА = 0 т для обоих реакторов Th и U производят относительно небольшие количества МА (Np, Am и Cm) и Pu во время работы. При МА = 5,82 т для SD-TMSR около 50% образующихся изотопов Pu в топливе потребляется в течение последних 25 лет эксплуатации, в то время как SMSFR потребляет около 86,5% образующихся изотопов Pu в топливе за последние 25 лет. Таким образом, за 30 лет работы оба реактора могут эффективно сжигать превращенные изотопы Pu. Результаты показывают, что оба реактора эффективно трансмутируют ^{237}Np , ^{241}Am , ^{243}Am и ^{243}Cm , в то время как SMSFR имеет более высокий коэффициент трансмутации, чем SD-TMSR. Для SD-TMSR максимальный коэффициент трансмутации для всех МА составляет 54,84% при $t = 20$ лет. Для SMSFR 40 лет эксплуатации приводят к относительно высокому коэффициенту трансмутации – 87,97%. Этот высокий коэффициент трансмутации обусловлен высоким нейтронным потоком в SMSFR по сравнению с SD-TMSR. На основании анализа SD-TMSR и SMSFR было установлено, что SMSFR лучше, чем SD-TMSR, в достижении цели трансмутации.

Работа финансировалась Программой конкурентоспособности МИФИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ REFERENCES

- [1] Liu B., Jia R., Han R., Lyu X., Han J., Li W. Minor Actinide Transmutation Characteristics in AP1000 // *Annals of Nuclear Energy*. 2018. Vol. 115. P. 116-125.
- [2] Ramirez J.R., Enriquez P., Castillo R., Alonso G. MOX Fuel Use in a BWR with Extended Power Up-Rate // *Annals of Nuclear Energy*. 2012. Vol. 50. P. 63-70.
- [3] Liu, B., Hu, W., Wang, K., Huang, L., Ouyang, X., Tu, J., Zhu, Y. Transmutation of MA in the High Flux Thermal Reactor // *Journal of Nuclear Materials*. 2013. Vol. 437. P. 95-101.
- [4] Salvatores, M., Slessarev, I., Uematsu, M. A Global Physics Approach to Transmutation of Radioactive Nuclei // *Nuclear Science and Engineering*. 1994. Vol. 116. P. 1-18.
- [5] DoE, U.S. A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems. 2002. URL: http://gif.inel.gov/roadmap/pdfs/gen_iv_roadmap.pdf.
- [6] Leppänen, J., Pusa, M., Viitanen, T., Valtavirta, V., Kaltiaisenaho, T. The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013 // *Annals of Nuclear Energy*. 2014. Vol. 82. P. 142-150.
- [7] Li, G.C., Cong, P., Yu, C.G., Zou, Y., Sun, J.Y., Chen, J.G., Xu, H.J. Optimization of Th-U Fuel Breeding Based on a Single-Fluid Double-Zone Thorium Molten Salt Reactor // *Progress in Nuclear Energy*. 2018. Vol. 108. P. 144-151.

- [8] Robertson, R.C. CONCEPTUAL DESIGN STUDY OF A SINGLE-FLUID MOLTEN-SALT BREEDER REACTOR. (No. ORNL-4541). comp.; Oak Ridge National Lab., Tenn. 1971.
- [9] Nuttin, A., Heuer, D., Billebaud, A., Brissot, R., Le Brun, C., Liatard, E., Loiseaux, J.M., Mathieu, L., Meplan, O., Merle-Lucotte, E., Nifenecker, H. Potential of Thorium Molten Salt Reactors detailed Calculations and Concept Evolution with a View to Large Scale Energy Production // Progress in Nuclear Energy. 2005. Vol. 46. P. 77-99.
- [10] Mukaiyama, T., Yoshida, H., Ogawa, T. Minor Actinide Transmutation in Fission Reactors and Fuel Cycle Considerations. «Use of Fast Reactors for Actinide Transmutation. Proceedings of a Specialists Meeting held in Obninsk, Russian Federation, 22-24 September 1992». Vienna. 1993.
- [11] Ashraf, O., Rykhlevskii, A., Tikhomirov, G.V., Huff, K.D. Whole Core Analysis of the Single-Fluid Double-Zone Thorium Molten Salt Reactor (SD-TMSR) // Annals of Nuclear Energy. 2020. Vol. 137. P. 107115.
- [12] Yu, C., Li, X., Cai, X., Zou, C., Ma, Y., Han, J., Chen, J. Analysis of Minor Actinides Transmutation for a Molten Salt Fast Reactor // Annals of Nuclear Energy. 2015. Vol. 85. P. 597-604.
- [13] Ashraf, O., Rykhlevskii, A., Tikhomirov, G.V., Huff, K.D. Strategies for Thorium Fuel Cycle Transition in the SD-TMSR // Annals of Nuclear Energy. 2020. Vol. 148. P. 107656.

Molten Salt Reactors with Thermal and Fast Spectrum for Minor Actinides Transmutation

O. Ashraf^{*,**1}, G.V. Tikhomirov^{*2}

^{*} Institute of Nuclear Physics and Engineering, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

^{**} Department of Physics, Faculty of Education, Ain Shams University, Cairo, Egypt

1 ORCID iD: 0000-0002-9442-102X

WoS Researcher ID: V-1340-2018

email: osama.ashraf@edu.asu.edu.eg

2 ORCID iD: 0000-0002-5332-7272

WoS Researcher ID: B-7860-2013

email: gvtikhomirov@mephi.ru

Abstract – Long-lived minor actinides (MA) like, Neptunium, Americium, and Curium are the major burden of nuclear power. Long-lived MAs have not yet been burned as nuclear fuel. Therefore, the transmutation of long-lived MAs is introduced as an alternative to direct final disposal. In current work, we compare the performance of MA transmutation in a critical Single-fluid Double-zone Thorium-based Molten Salt Reactor (SD-TMSR) and a Small Molten Salt Fast Reactor (SMSFR). We study the dynamic of K_{eff} and core reactivity with different MA loads, shift of the neutron spectrum, time evolution of MA and basic nuclide inventory, as well as the transmutation coefficient (TC). The TC of long-lived MA is calculated using the Monte Carlo code SERPENT-2. The total neutron flux in SD-TMSR and SMSFR can reach 4.1×10^{14} and 1.8×10^{15} n/cm²s, respectively. The results show that SD-TMSR consumes about 50% of the generated Pu isotopes in the fuel salt, however, SMSFR consumes about 86.5% of the generated Pu isotopes. During burnup, we apply online reprocessing and refueling, so the core remains critical, and the total mass of fuel in the core and in the blanket is practically constant. The results show that both reactors efficiently transmute ²³⁷Np, ²⁴¹Am, ²⁴³Am and ²⁴³Cm, while SMSFR has a higher TC than SD-TMSR. TC of total MA reaches 54.84% and 87.97% in SD-TMSR and SMSFR, respectively.

Keywords: molten salt reactor, transmutation, on-line-reprocessing, minor actinides, SERPENT, code Monte-Carlo, transmutation coefficient.

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 004.94

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРЕДОТКАЗНЫХ СОСТОЯНИЙ МАСЛООХЛАДИТЕЛЕЙ ГЦН АЭС ПО ПАРАМЕТРАМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

© 2020 В.В. Кривин, В.Я. Шпицер, В.А. Толстов, И.О. Ишигов

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

В статье представлены результаты эмпирического моделирования маслосистемы главных циркуляционных насосов АЭС, предназначенной для маслоснабжения опорных подшипников и их охлаждения. Эмпирическая модель дооснащает производственную платформу мониторинга, скользящим линейным предсказателем, что обеспечивает поддержание эксплуатационной безопасности и функциональной пригодности ГЦН. Исходными данными для предсказателя являются контролируемые параметры ГЦН.

Ключевые слова: мониторинг, прогнозирование, безопасность АЭС, главный циркуляционный насос, теплообменник, цифровая обработка сигналов, непараметрическая статистика, нормативные пределы, индикатор Соколова-Зингера, индикатор термической эффективности.

Поступила в редакцию 02.09.2020

После доработки 07.10.2020

Принята к печати 12.10.2020

Теплообменники маслосистемы главной циркуляционной системы (ГЦН) относятся к кожухотрубным системам, использующим для охлаждения технологическую воду из природного резервуара. В результате теплообменная поверхность и межтрубное пространство загрязняются (засоряются) и требуют вывода из эксплуатации для очистки. Прерывания эксплуатационного режима происходят в случайные моменты времени. Требуется выявлять начало функционального несоответствия и предсказывать момент достижения недопустимого уровня нарушения нормальных условий эксплуатации системы маслоснабжения ГЦН.

Целевым индикатором с нормативным ограничением по верхнему пределу является температура масла на выходе из теплообменника. Возможные нарушения режима эксплуатации представляются исключительно переходными процессами при глубоком возмущении расходной характеристики в контуре охлаждающей воды.

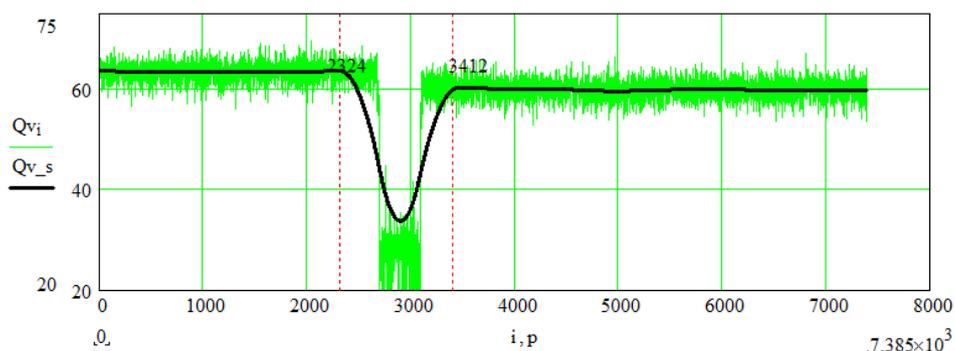


Рисунок 1 – Расход технической воды через теплообменник Q_v ($\text{м}^3/\text{ч}$), и его сглаженная копия – Q_{v_s} ; по оси абсцисс – номер измерения (аналог времени) [Consumption of technical water through the heat exchanger Q_v (cmph), and its smoothed copy – Q_{v_s} ; abcess axis is index of measurement (analogue of time)]

На рисунке 1 приведены измерения объёмного расхода технической воды через теплообменник, выполненные с дискретизацией 12,28 с. в течение месяца и сглаженная копия сигнала. Данные содержат возмущение объёмного расхода технической воды с $64 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $34 \text{ м}^3/\text{ч}$ продолжительностью 1,98 ч с последующим восстановлением в течение 1,73 ч до значения $60 \text{ м}^3/\text{ч}$. Если результатом возмущения является переход на стационарный уровень расхода ниже нормативного (например $30 \text{ м}^3/\text{ч}$), то это повод к аварийному управлению.

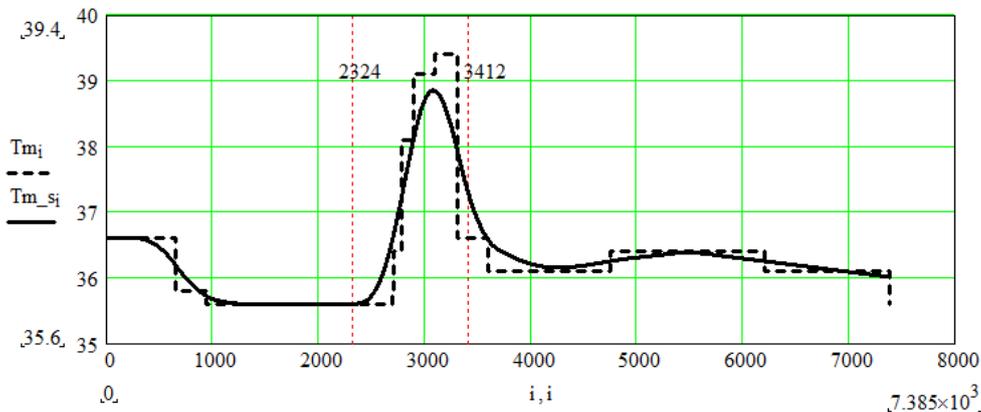


Рисунок 2 – Температура масла на выходе из теплообменника T_m и её сглаженная копия T_{m_s}
[The oil temperature at the outlet of the heat exchanger T_m and its smoothed copy T_{m_s}]

На рисунке 2 приведены одновременно измеренные значения температуры масла на выходе из теплообменника. Реакция по температуре масла запаздывает на 0,61 ч. По этому индикатору установлена нормативная граница 40 C° , которая в данном возмущении не превышает.

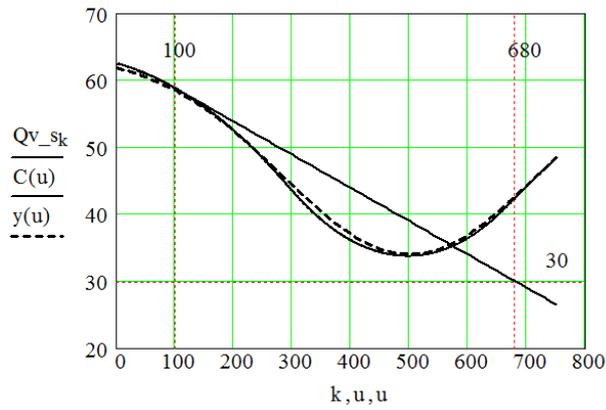
Приведенная пара сигналов может рассматриваться как типичный образ предвестника отказа, причём мониторинг сбросов расхода охлаждающей воды обеспечивает более раннее предупреждение. Локализацию предвестников ненормативных состояний и предсказание момента установления регламентного несоответствия, возможно, получать разными методами. Можно выделить статистическую идентификацию [1, 2] на архивном материале и глубокое обучение нейросетевого классификатора [3, 4].

В данной статье исследуется возможность применения линейного экстраполятора и некоторых специализированных индикаторов, удобных в технологии скользящего окна. Результаты прогноза состояний предлагаются оперативному персоналу как предупредительные. Алгоритм основан на сглаженной копии измеряемого сигнала для объёмного расхода и включает следующие действия:

1. Устанавливается контрольный уровень снижения объёмного расхода в контуре охлаждающей воды, например на 10% от средней текущей величины. Значения выше этого порога образуют квазистационарный временной ряд.

2. Фиксируется окно шириной $s \sim 100$ точек, которые обрабатываются и сохраняются в накопителе. Поступающие измерения, например, по 10 значений «проталкивают» в окне старые, становясь последними, и вновь запускается алгоритм обработки.

3. При обработке данных находится точка пересечения секущей дуги кривой, ограниченной окном, с нормативной нижней границей расходной характеристики (прогноз момента превышения предела). Подгоняется аппроксимация ожидаемой формы выброса. Минимум аппроксимации принимается за прогностическое значение объёмного расхода. Если прогностическое значение ниже нормативного, то это повод для сообщения оператору.



а.

Рисунок 3 – Аппроксимация гауссианом: $Qv_s(u)$ – сглаженная копия сигнала; $C(u)$ – скользящая секущая; $y(u)$ – гауссиан [Gaussian approximation: $Qv_s(u)$ – smoothed signal copy; $C(u)$ – moving secant; $y(u)$ – Gaussian]

Данным способом обрабатываются унимодальные кривые, аппроксимация которых может быть трёхпараметрической. Ниже представлены иллюстрации алгоритма с аппроксимацией выброса гауссианом (рис. 3) и произведением степенной и показательной функций (рис. 4).

На рисунке 3: 100 – ширина скользящего окна; 680 – абсцисса пересечения секущей и нормативного предела; 30 – нормативный предел; гауссиан определяется формулой (1):

$$y(u) = 64 - \exp\left(\frac{-(u-500)^2}{95000}\right). \quad (1)$$

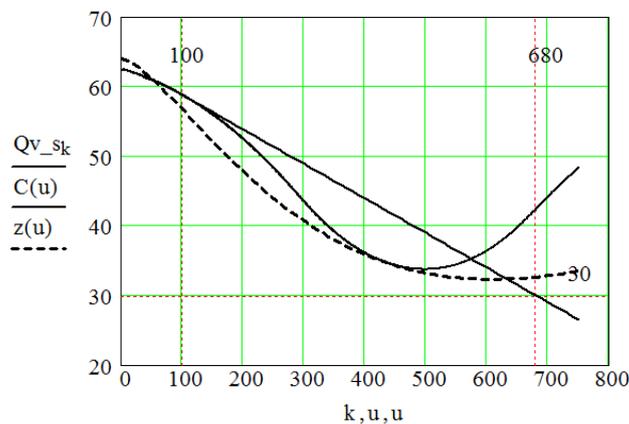


Рисунок 4 – Аппроксимация произведением степенной и показательной функций: $Qv_s(u)$ – сглаженная копия сигнала; $C(u)$ – скользящая секущая; $z(u)$ – аппроксимация [Approximation by the product of power and exponential functions: Gaussian approximation: $Qv_s(u)$ – smoothed signal copy; $C(u)$ – moving secant; $y(u)$ – approximation]

На рисунке 4: 100 – ширина скользящего окна; 680 – абсцисса пересечения секущей и нормативного предела; 30 – нормативный предел; аппроксимация определяется формулой (2):

$$z(u) = 64 - a \times u^b \times \exp(c \times u), \quad (2)$$

где $a = 0,0085$;
 $b = 1,52$;
 $c = -0,0025$.

Параметры модели возмущения расходной характеристики оцениваются методом наименьших квадратов (МНК). По мере накопления измерений достоверность прогноза повышается.

Описанный алгоритм подвергается обучению на множестве форм возможных возмущений объёмного расхода охлаждающего теплоносителя. Результатом обучения является формирование пространства однотипных векторов параметров аппроксимации. Предсказания возможных ненормативных состояний при повторных возмущениях производится в сконструированном пространстве вычислением средних по ближайшим соседям к последнему набору значений [5, 6].

Пусть исследуются возмущения измеряемой величины, возникающие в случайные моменты времени. Для первых двух возмущений ($j = 1, 2$) найдены наборы параметров аппроксимации сглаженных измерений во всех скользящих окнах $\hat{a}_{ij}, \hat{b}_{ij}, \hat{c}_{ij}; i = 1, \dots, m; j = 3, \dots, n$. Здесь i – номера скользящих окон, а j – номер текущего возмущения. Для возмущения № 3 $\hat{a}_{i3} = \frac{(\hat{a}_{i1} + \hat{a}_{i2})}{2}, \hat{b}_{i3} = \frac{(\hat{b}_{i1} + \hat{b}_{i2})}{2}, \hat{c}_{i3} = \frac{(\hat{c}_{i1} + \hat{c}_{i2})}{2}$. Для всех последующих формируется множество «ближайших соседей» к последнему измерению.

Обозначим $X_{is} = (\hat{a}_{is}, \hat{b}_{is}, \hat{c}_{is})$, $X_{ir} = (\hat{a}_{ir}, \hat{b}_{ir}, \hat{c}_{ir})$ – вектора, координатами которых являются значения параметров аппроксимаций i – номера скользящего окна, а s, r – номера соответствующих возмущений. Расстояние между ними обозначим $\rho(X_{is}, X_{ir})$. Вектор X_{iN} , координатами которого являются значения параметров аппроксимации последнего измерения назовём стартовым. Задавшись нужным числом m соседей, будем считать соседними к стартовому вектору X_{iN} Указанное число m этих векторов $X_{i(N-s)}$ удовлетворяющих условию, формула (3):

$$\sum_{s=1}^m \rho(X_{iN}, X_{i(N-s)}) = \min_{Q \in \Omega} [\sum_{s \in Q} \rho(X_{iN}, X_{i(N-s)})], \quad (3)$$

где Q – произвольный набор номеров длины m , Ω – множество всех наборов номеров значений ряда длины m , кроме номеров координат стартового вектора.

Результатом прогноза считаем среднее значение по найденным ближайшим соседям, формула (4):

$$X_{i(N+1)} \approx \left(\sum_{s=1}^m \frac{\hat{a}_{is}}{m}, \sum_{s=1}^m \frac{\hat{b}_{is}}{m}, \sum_{s=1}^m \frac{\hat{c}_{is}}{m} \right). \quad (4)$$

Мониторинг квазистационарного состояния в рамках регламентной эксплуатации не предполагает предсказаний, но на этом материале можно оценивать постепенное снижение термической эффективности теплообменника. На рисунке 5 иллюстрация квазистационарного регламентного расхода технической воды и его сглаженная копия.

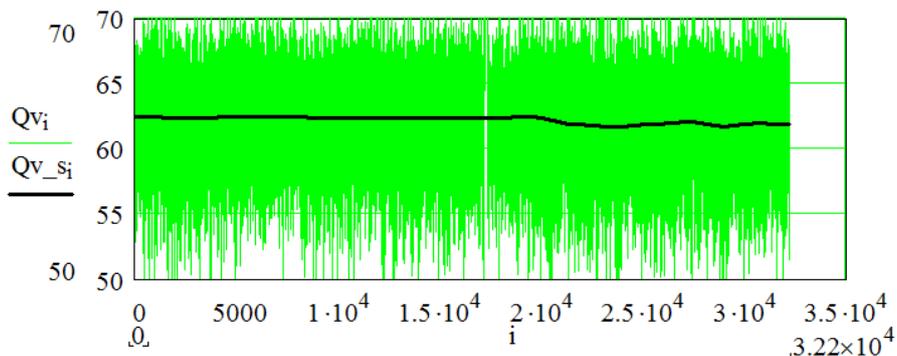


Рисунок 5 – Объёмный расход технической воды при нормальных условиях эксплуатации ($\text{м}^3/\text{ч}$)
[Volumetric flow rate of service water under normal operating conditions (cmph)]

Подробная структура сглаженной копии предстала на рисунке 6.

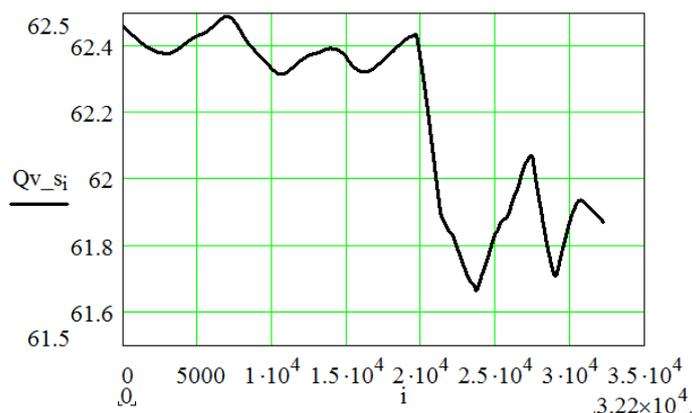


Рисунок 6 – Структура расходной характеристики в условиях штатной эксплуатации; продолжительность измерений ~ 4,6 суток (сглаженная копия) [The structure of the flow rate characteristics under normal operating conditions; measurement duration ~ 4.6 days (smoothed copy)]

Этой расходной характеристике соответствует график температуры масла на выходе из теплообменника рисунке 7.

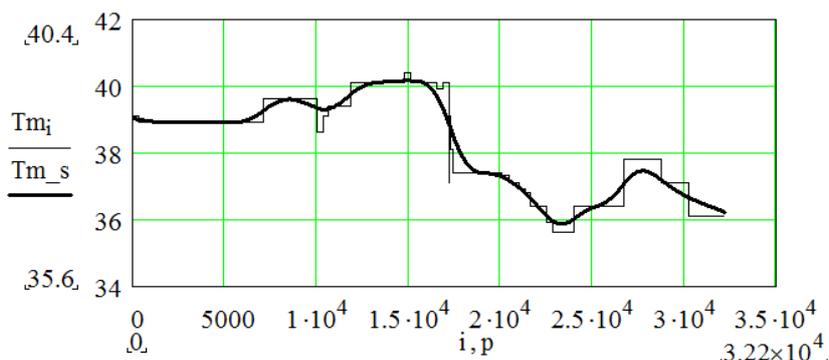


Рисунок 7 – Измерения и сглаживания копии температуры масла на выходе из теплообменника [Measurements and smoothed copies of the temperature of the oil on the heat exchanger output]

Подобные измерения обычно обрабатываются с помощью автокорреляционных и взаимокорреляционных функций [7, 8] относительно выбранных базовых участков кривых. В данной статье применены специализированные теплотехнические индикаторы.

Индикатор Соколова-Зингера индикатор известный как «параметр водо-водяного подогревателя» эффективно используется для построения систем мониторинга водо-водяных теплообменников [9, 10]. Мониторинг осуществляется по текущему значению показателя относительно значения для нормальных условий эксплуатации, формула (5):

$$\Phi = \frac{\sqrt{\delta t_M \delta t_{\text{Вод}}}}{\Delta t}, \quad (5)$$

где δt_M , $\delta t_{\text{Вод}}$ – изменение температур масла и воды в теплообменнике;

$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}} - \text{температурный напор};$$

$\Delta t_{\text{б}}$ – большее значение;

$\Delta t_{\text{м}}$ – меньшее значение разностей температур.

На рисунке 8 приведено поведение «индикаторов Соколова-Зингера» в интервале 61.7-62.5 м³/ч для нормальных условий эксплуатации (Φ_N) и с внесением 5%-ного возмущения по температуре масла (Φ). Для (Φ_N) может быть декларирован нормативный коридор, относительно которого фиксируется смещение текущей траектории.

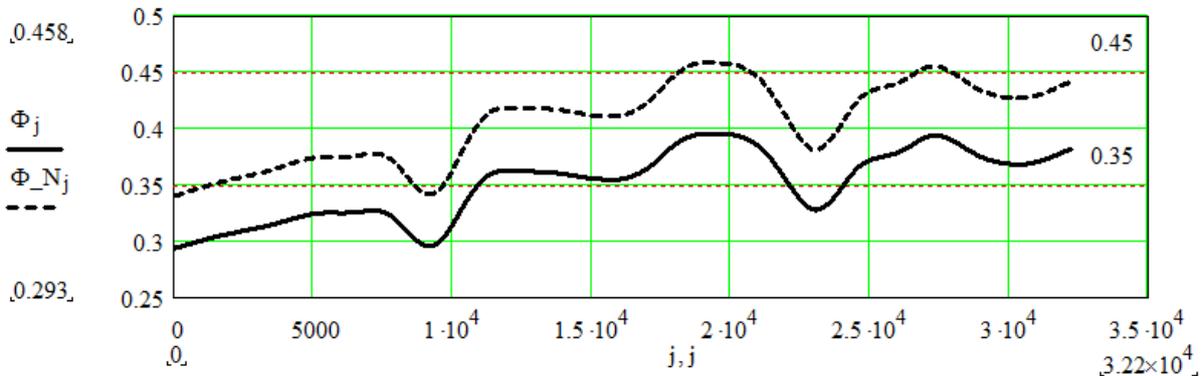


Рисунок 8 – Индикаторы Соколова-Зингера в интервале 61.7 – 62.5 м³/ч для нормальных условий эксплуатации (Φ_N) и с внесением 5%-ного возмущения по температуре масла (Φ) [Sokolov-Singer indicators in the range 61.7 – 62.5 cmph for normal operating conditions (Φ_N) and with the introduction of 5% disturbance in oil temperature (Φ)]

На рисунке 9 приведена шкала (0, 1) дефектности по соотношению (1-Φ/Φ_N) для маслоохладителя. Линейный «предсказатель» дефектности состояния теплообменника определяется на этой шкале. Прогнозирование превышения нормативного предела температуры масла на основе этого показателя может быть выведено для визуального контроля.

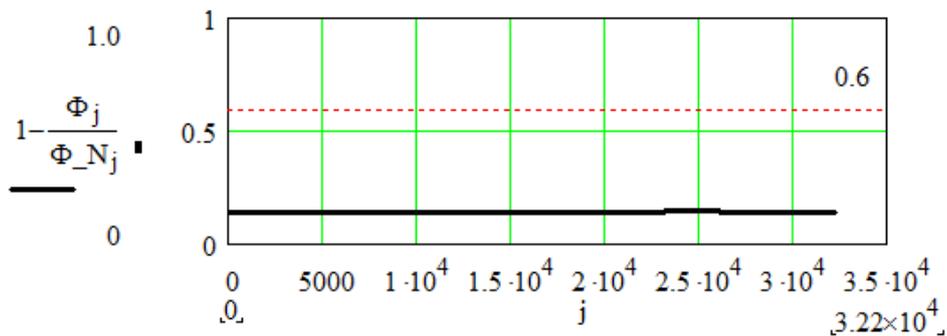


Рисунок 9 – Шкала (0,1) дефектности по соотношению (1-Φ/Φ_N) для маслоохладителя [Defectiveness scale (0.1) according to the ratio (1-Φ / Φ_N) for oil cooler]

Индикаторы на основе коэффициентов термической эффективности [11]. В интервале 60-63 м³/ч водяной эквивалент масла значительно меньше соответствующего значения для воды. В этом случае коэффициент термической эффективности теплообменника вычисляется по формуле (6):

$$\epsilon = \frac{t_M^{Bx} - t_M^{Byx}}{t_M^{Bx} - t_{Вод}^{Bx}} \quad (6)$$

На рисунке 10 коэффициенты термической эффективности теплообменника в интервале 61.7-62.5, м³/ч для нормальных условий эксплуатации (Θ) и с внесением 5%-ного возмущения по температуре масла (Θδ).

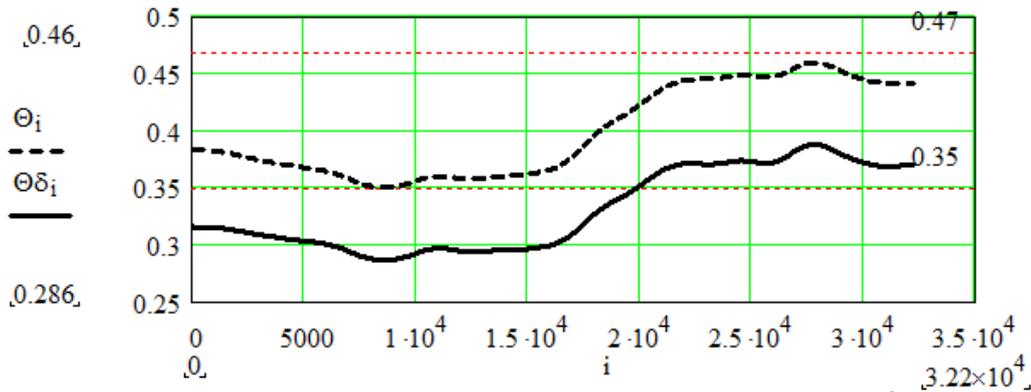


Рисунок 10 – Коэффициенты термической эффективности в интервале 61.7 – 62.5, м³/ч для нормальных условий эксплуатации (Θ) и с внесением 5%-ного возмущения по температуре масла ($\Theta\delta$) [Thermal efficiency coefficients in the range 61.7 – 62.5 cmph for normal operating conditions (Θ) and with the introduction of 5% disturbance in oil temperature ($\Theta\delta$)]

Можно использовать ещё один индикатор термической эффективности [12], формула (7):

$$r = \frac{t_{\text{Вод}}^{\text{Вых}} - t_{\text{Вод}}^{\text{Вх}}}{t_{\text{М}}^{\text{Вх}} - t_{\text{М}}^{\text{Вых}}} \quad (7)$$

На рисунке 11 индикатор термической эффективности теплообменника в интервале 61.7-62.5, м³/ч для нормальных условий эксплуатации (Ω) и с внесением 5%-ного возмущения по температуре масла ($\Omega\delta$).

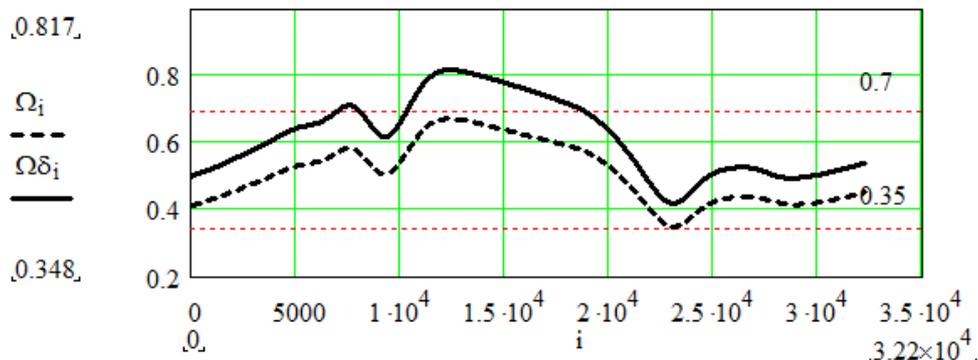


Рисунок 11 – Индикаторы термической эффективности в интервале (61.7 – 62.5, м³/ч) для нормальных условий эксплуатации (Ω) и с внесением 5%-ного возмущения по температуре масла ($\Omega\delta$) [Thermal efficiency indicators in the range 61.7 – 62.5 cmph for normal operating conditions (Ω) and with the introduction of 5% disturbance in oil temperature ($\Omega\delta$)]

Очевидно, что на этих индикаторах можно построить систему прогноза и мониторинга, так же как и на «индикаторе Соколова-Зингера». Из всех подобных конструкций индикаторов, допустимых для маслоохладителей ГЦН, рассмотренные – являются наиболее практичными. Применение «Индикаторов Соколова-Зингера» и «Индикаторов на основе коэффициентов термической эффективности» позволяет сформировать универсальную линейную шкалу дефектности теплообменника и осуществлять прогнозируемый вывод его из эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Славутский, Л. А. Основы регистрации данных и планирования эксперимента / Л. А. Славутский. – Чебоксары : Издательство ЧГУ, 2006. – 200 с.

2. *Фомин, Я. А.* Теория выбросов случайных процессов / Я. А. Фомин. – Москва : Связь, 1980. – 216 с.
3. *Коэльо, Л. П.* Построение систем машинного обучения на языке Python / Л. П. Коэльо, В. Ричарт; перевод с английского А. А. Слинкин. – Москва : ДМК Пресс, 2016. – 302 с.
4. *Флах, П.* Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных / П. Флах. – Москва : ДМК Пресс, 2015. – 400 с.
5. *Лоскутов, А. Ю.* Основы теории сложных систем / А. Ю. Лоскутов, А. С. Михайлов. – Москва – Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2007. – 620 с.
6. *Сысоев, Ю. С.* Использование временных рядов для формирования промежутков однотипного поведения параметров объекта при различных способах прогнозирования / Ю. С. Сысоев // Измерительная техника, 2018. – № 2. – С. 8-12.
7. *Орлов, А. И.* Прикладная статистика / А. И. Орлов. – Москва : Экзамен, 2004. – 656 с.
8. *Орлов, Ю. Н.* Индикативные статистики для нестационарных временных рядов / Ю. Н. Орлов, Д. О. Шагов // Препринты ИПМ им. М. В.Келдыша, 2011. – № 53. – С. 20. – URL : <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-53> (дата обращения: 02.09.2020).
9. *Зингер, Н. М.* Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем / Н. М. Зингер – Москва : Энергоатомиздат. 1986. – 320 с.
10. *Соколов, Е. Я.* Теплофикация и тепловые сети / Е. Я. Соколов – Москва : Издательство МЭИ, 1999. – 472 с.
11. *Уонг, Х.* Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров / Х. Уонг – Москва : Атомиздат, 1979. – 216 с.
12. *Белкин, А. П.* Диагностика теплоэнергетического оборудования / А. П. Белкин, О. А. Степанов. – Санкт-Петербург : Лань, 2018. – 240 с. URL : <https://e.lanbook.com/book/105988> (дата обращения: 02.09.2020).

REFERENCES

- [1] Slavutskiy L.A. Osnovy` registracii danny`x i planirovaniya e`ksperimenta [The Basis of Data Registration and Experiment Planning]. Cheboksary: Izdatel'stvo CHGU [Cheboksary: Publishing house of ChGU]. 2006. 200 p. (in Russian).
- [2] Fomin Ya.A. Teoriya vy`brosov sluchajny`x processov [The Theory of Random Process Outliers]. Moskva: Svyaz`. [Moscow: Communication]. 1980. 216 p. (in Russian).
- [3] Coelho L.P., Richart V. Postroenie sistem mashinnogo obucheniya na yazy`ke Python [The Building of Machine Learning Systems in Python Language]. Moskva: DMK Press [Moscow: DMK Press]. 2016. 302 p. (in Russian).
- [4] Flach P. Mashinnoe obuchenie. Nauka i iskusstvo postroeniya algoritmov, kotory`e izvlekayut znaniya iz danny`x [The Machine Learning. The Science and Art of Building Algorithms that Extract Knowledge from Data]. Moskva: DMK Press [Moscow: DMK Press]. 2015. 400 p. (in Russian).
- [5] Loskutov A.Yu., Mikhailov A.S. Osnovy` teorii slozhny`x system [The Basis of Complex System Theory]. Moscow-Izhevsk: Institut komp`yuterny`x issledovaniy [The Institute of Computer Science]. 2007. 620 p. (in Russian).
- [6] Sysoev Yu.S. Ispol`zovanie vremenny`x ryadov dlya formirovaniya promezhutkov odnotipnogo povedeniya parametrov ob`ekta pri razlichny`x sposobax prognozirovaniya [The Time Series Usage for the Formation of Intervals of Same Type Behavior of Object Parameters with Different Forecasting Methods]. Izmeritel`naya texnika [Measuring equipment]. 2018. №2. P. 8-12 (in Russian).
- [7] Orlov A.I. Prikladnaya statistika [Applied Statistics]. Moskva: Ekzamen [Moscow: Examination]. 2004. 656 p. (in Russian).
- [8] Orlov Yu.N., Shagov D.O. Indikativny`e statistiki dlya nestacionarny`x vremenny`x ryadov [Indicative Statistics for Non-Stationary Time Series]. Preprinty IPM im. M.V. Keldysha [Keldysh Institute Preprints. M.V. Keldysh]. 2011. N53. 20 p. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-53> (in Russian).
- [9] Zinger N.M. Gidravlicheskie i teplovy`e rezhimy` teplofikacionny`x sistem [Hydraulic and Thermal Modes of Heating Systems]. Moskva: Energoatomizdat [Moscow: Energoatomizdat]. 1986. 320 p. (in Russian).
- [10] Sokolov E.Ya. Teplofikaciya i teplovy`e seti [Heating and Heat Networks]. Moskva: Izdatel'stvo MEI [Moscow: MPEI Publishing House]. 1999. 472 p. (in Russian).
- [11] Uong X. Osnovny`e formuly` i danny`e po teploobmenu dlya inzhenerov [Basic Formulas and Data of Heat Transfer for Engineers]. Moskva: Atomizdat [Moscow: Atomizdat]. 1979. 216 p. (in Russian).

- [12] Belkin A.P., Stepanov O.A. Diagnostika teploe`nergeticheskogo oborudovaniya [Diagnostics of Heat and Power Equipment]. Sankt-Peterburg: Lan`[St. Petersburg: Lan]. 2018. 240 p. URL: <https://e.lanbook.com/book/105988> (in Russian).

The Identification of Pre-Failure Conditions of Oil Coolers of NPP MCP by Operating Parameters

V.V. Krivin¹, V.Ya. Shpicer², V.A. Tolstov³, I.O. Ishigov⁴

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI",
Lenina street, 73/94, Volgodonsk, Russia 347360*

¹*ORCID iD: 0000-0003-0903-0786*

WoS Researcher ID: E-2267-2018

e-mail: vvkkrivin@mephi.ru

²*ORCID iD: 0000-0002-5051-5091*

e-mail: shpitsler@mephi.ru

³*ORCID iD: 0000-0001-7144-5195*

WoS ResearcherID: F-1032-2017

e-mail: v-tolstov-2017@mail.ru

⁴*ORCID iD: 0000-0002-5829-6989*

WoS Researcher ID: E-2448-2018

e-mail: ioishigov@mephi.ru

Abstract – The article deals with the results of empirical modeling of the oil system of the main circulation pumps of a nuclear power plant, designed for oil supply to support bearings and their cooling. The empirical model extends the industrial monitoring platform with a sliding linear predictor to maintain the operational safety and operability of the MCP. The initial data for the predictor are the controlled parameters of the MCP.

Keywords: monitoring, forecasting, NPP safety, main circulation pump, heat exchanger, digital signal processing, nonparametric statistics, regulatory limits, Sokolov-Singer indicator, indicator of thermal efficiency.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.311.25:621.039.5

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
МЕТАЛЛА ЭЛЕМЕНТОВ И ДЕТАЛЕЙ ТРУБОПРОВОДОВ АЭС

© 2020 А.К. Адаменков*, И.Н. Веселова**

*Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

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

В рамках проведения экспериментальной оценки напряженно-деформированного состояния элементов трубопроводов АЭС с помощью приборов на основе магнитоанизотропного метода, были получены критерии параметров разности главных механических напряжений (РГМН), характеризующие повышенную вероятность развития эрозионно-коррозионного износа (ЭКИ). Установлено, что высокий уровень значений РГМН в комплексе с результатами обработки измерений по параметрам первой производной и градиента РГМН, зависящие от шага сканирования в узлах координатной сетки, являются дополнительными критериями для обнаружения потенциально опасной области развития ЭКИ.

Ключевые слова: магнитоанизотропия, механические напряжения, градиентный подход, производная напряжений, локальные участки.

Поступила в редакцию 27.10.2020

После доработки 19.11.2020

Принята к публикации 24.11.2020

В работе «Оценка развития эрозионно-коррозионного износа с помощью метода измерения магнитной анизотропии» [1] показано, что:

1. В результате обследования участков трубопроводов турбинного отделения, методом магнитной анизотропии (МА), возможно выявление локально напряженных зон, которые образуются при утонении стенки, вызванным вероятным ЭКИ.

2. Диагностирование участков трубопроводов, подверженным ЭКИ может являться дополнительной контрольной операцией, повышающей достоверность оценки эксплуатационной надежности трубопроводов АЭС.

В настоящей работе представлены результаты дальнейших исследований в данной области, проводимые на трубопроводах энергоблоков АЭС.

Один из критериев, характеризующих отсутствие ЭКИ трубопроводов при проведении гидроиспытаний – отсутствие видимых остаточных деформаций на поверхности объекта после снятия нагрузки. Остаточные деформации являются следствием пластических, которые происходят в местах локального утонения стенки трубопровода. С одной стороны, согласно условию пластичности Треска-Сен-Венана, пластическая деформация наступит, когда максимальная разность главных нормальных напряжений достигнет величины сопротивления деформации [2, 3]. С другой – согласно энергетической теории пластичности Губера-Мизеса [4, 5], пластическая деформация начинается, когда количество удельной потенциальной энергии формоизменения, определяемой градиентом напряжений, и накопленной деформированным элементом, достигает своего предельного значения.

Действующие в настоящее время нормативно-технические документы в атомной энергетике [6, 7] устанавливают различные подходы к оценке для расчетов на

прочность трубопроводов АЭС в зависимости от величины дефектного участка. При этом оцениваются локальные дефекты, которыми характеризуется ЭКИ трубопроводов.

При оценке напряженно-деформированного состояния металлоконструкций методом МА, основным диагностическим признаком является оценка изменения разности главных механических напряжений [8, 9] в различных областях конструкций.

Для оценки прочности в локальных зонах, предлагается выполнять оценку НДС такого участка с точки зрения градиентного подхода [10], в соответствии с которым локальная прочность материала предполагается зависящей от размера зоны концентрации напряжений. Если размеры зоны концентрации сопоставимы с толщиной материала, их влияние на локальную прочность становится заметным.

Градиент, в свою очередь, определяется производной вектора РГМН по его направлению, и является вектором показывающим направление наискорейшего изменения скалярного поля напряжений в области их концентрации. Локальные напряжения, таким образом, зависят от локальной неравномерности поля напряжений в окрестности рассматриваемой области концентратора механических напряжений и представительного размера неоднородности материала.

В работах [11, 12] показаны возможности применения метода МА и использование общих критериев МА для оценки повреждаемости сварных соединений.

В данной статье для повышения достоверности оценки НДС при ЭКИ, предлагается локальную неравномерность распределения напряжений характеризовать оценкой следующих законов изменений параметров поперек образующей стенки трубопровода:

- разности главных механических напряжений;
- градиента ГРМН;
- производной РГМН по направлению образующей.

В результате обследования участков трубопроводов методом МА построены и проанализированы картограммы РГМН, градиента РГМН и производной «dY» по поперечному направлению трубопровода.

Для более детального анализа ПО «Stressvision Expert» при построении картограмм в формате 2D позволяет выполнять оценку распределения значений по выбранным линейным сечениям в виде графиков (рис. 1).

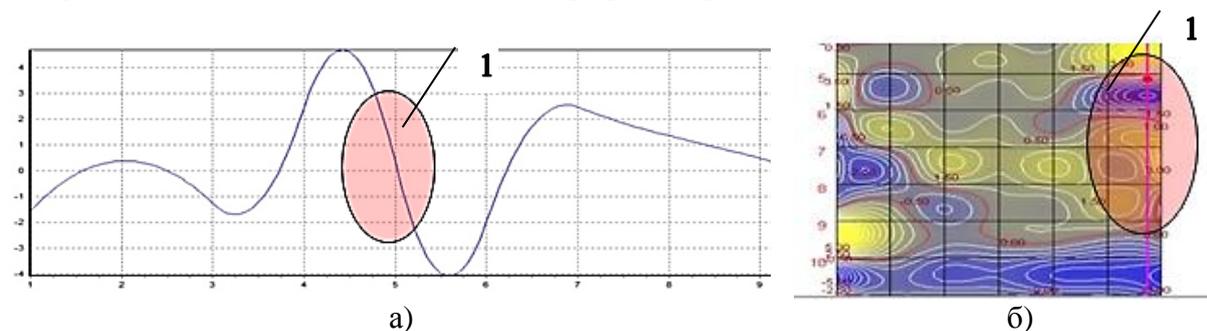


Рисунок 1 – Распределение производной по оси Y между 6-7 линиями: а) производная РГМН по оси «Y» (образующая трубопровода); б) – фрагмент карты ГРМН с зоной локальных напряжений – 1 [Distribution of the derivative along the Y-axis between 6-7 lines: a) the derivative of the difference of the main mechanical stresses along the Y-axis (the generatrix of the pipeline); b) – a fragment of the map of the difference between the main mechanical stresses with a zone of local stresses – 1]

Зафиксировано, что в зонах локального увеличения значений РГМН их производная по оси «Y» изменяется с максимальной до минимальной величины, при этом проходя через ноль.

При последующей оцифровке построенных графиков распределения они представлены в виде зависимости величины параметра от координаты зоны. Полученные данные стандартизируются, строится совместный график зависимости

стандартизированных значений РГМН, производной РГМН по оси «Y» и градиента РГМН от координат зоны (рис. 2).

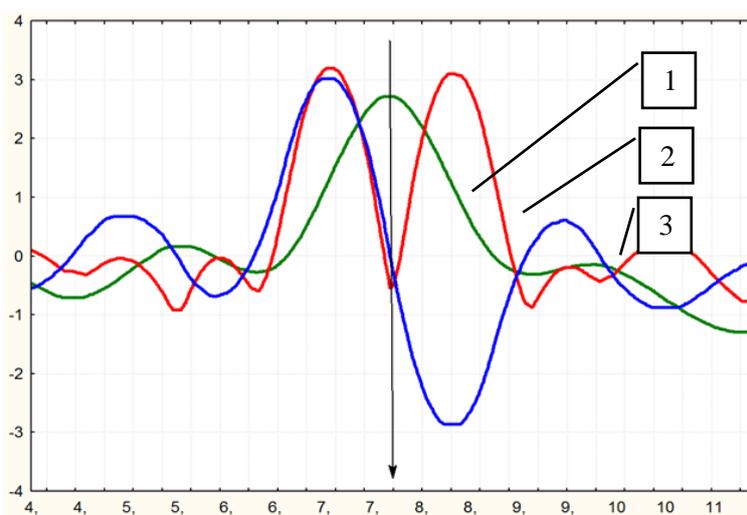


Рисунок 2 – Совместный график зависимости стандартизированных значений РГМН, производной РГМН по оси «Y» и градиента РГМН от координат зоны 6503 (1 – РГМН; 2 – градиент; 3 – D_y) [Joint graph of the dependence of the standardized values of the difference between the main mechanical stresses, the derivative of the difference between the main mechanical stresses along the "Y" axis and the gradient of the difference between the main mechanical stresses on the coordinates of the zone 6503 (1 – difference between the main mechanical stresses; 2 – gradient; 3 – D_y)]

Анализ совместного графика позволил сформировать новые критерии фиксации потенциально опасной зоны развития ЭКИ, которое заключается в следующем: значение РГМН в данном сечении принимает свое максимальное значение, в этом же сечении значение градиента РГМН – минимальное, при этом максимумы располагаются по границам локально-деформированной зоны, а производная РГМН по оси «Y» проходит через нулевое значение и достигает максимального и минимального значения на границах зоны. В выполненных ранее исследованиях [11, 12] показано, что при использовании метода МА для оценки повреждаемости сварных соединений законы изменения параметров другие.

Фиксирование потенциально опасных зон развития ЭКИ выполняется согласно установленному ранее [11, 12] критерию отношения максимального значения РГМН к минимальному значению РГМН, которое больше или равно 2. При обработке данных обследования были определены зоны соответствующие критерию. Для рассмотрения выбран глубокий слой (0-6 мм), так как он является внутренней поверхностью трубопровода, контактирующей с рабочей средой.

Указанному критерию соответствуют следующие зоны: 6506, 6503, 6502 и 6500. Построение совместных графиков значений РГМН, производной РГМН по оси «Y» и градиента РГМН от координат зоны производилось и для остальных выбранных зон.

Например, зона 6503. Координаты локально напряженной зоны – 5 линия, точка 8, со следующими максимальными значениями стандартизированных величин (табл. 1, см. рис. 2).

Таблица 1 – Максимальные значения зоны 6503 [Maximum zone values 6503]

РГМН	Градиент РГМН	Производная РГМН по оси «Y»
2,71	3,19	3,01

Аналогичные законы изменения зафиксированы и в остальных, отмеченных выше, зонах.

Графическая интерпретация полученных данных представлена на диаграмме (рис. 3). Кластерный анализ данных позволяет сделать вывод о наличии наиболее потенциально опасных зон, подверженных ЭКИ – 65503, 65518, 65533. Выполненные впоследствии измерения толщины обследованных МА участков, показали, что указанные выше зоны характеризуются меньшей толщиной, по сравнению с остальными зонами. При этом, предельный критерий уменьшений толщины не достигнут.

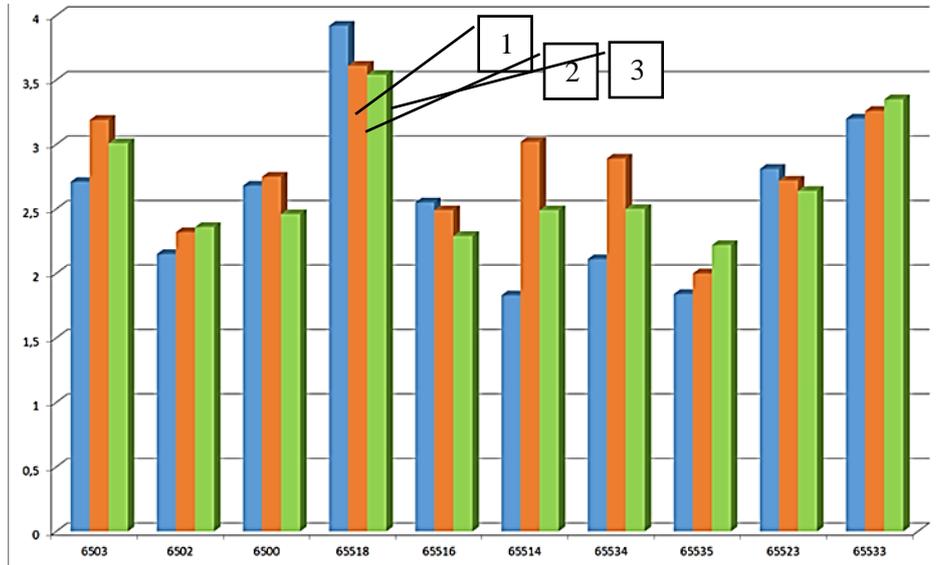


Рисунок 3 – Диаграмма характеристик критериев зон (1 – РГМН; 2 – градиент; 3 – D_y) [Diagram of zone criteria characteristics (1 – difference between the main mechanical stresses; 2 – gradient; 3 – D_y)]

Выводы:

1. Определены критерии для достоверной фиксации потенциально опасной зоны развития ЭКИ:

- значение РГМН в сечении зоны принимает свое максимальное значение;
- значение градиента РГМН – минимальное, при этом максимумы располагаются по границам зоны;
- производная РГМН по оси «Y» проходит через нулевое значение и достигает максимального и минимального значения на границах зоны.

2. Определены локальные зоны, характеризующиеся изменениями параметров МА.

3. Все остальные обследованные участки не имеют ярко выраженных концентраторов напряжений и характеризуются достаточно равномерным распределением уровней разности главных механических напряжений.

4. НДС металла всех обследованных участков трубопроводов характеризуется отсутствием критериев предельного состояния.

5. Зоны с выявленными вероятными локальными участками утонения, требуют более детального анализа при дальнейшем обследовании с использованием других методов неразрушающего контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адаменков, А. К. Оценка развития эрозивно-коррозионного износа с помощью метода измерения магнитной анизотропии / А. К. Адаменков, И. Н. Веселова, В. Я. Шпицер // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 1 (30). – С. 113-119.

2. Александров, А. В. Сопротивление материалов / А. В. Александров. – Москва : Высшая школа, 2003. – С. 380-383.
3. Конакова, М. А. Анализ влияния различных факторов на аварийные разрушения МГ / М. А. Конакова, А. А. Волков, А. Я. Яковлев, С. В. Романцов // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2007. – № 6. – С. 7-12.
4. Hosford, W. F. Mechanical Behavior of Materials / W. F. Hosford. – New-York: Cambridge University Press, 2005. – 342 p.
5. Соснин, О. В. К обоснованию энергетического варианта теории ползучести и длительной прочности металлов / О. В. Соснин, А. Ф. Никитенко, Б. В. Горев // Прикладная механика и техническая физика. – 2010. – Т. 51, № 4. – С. 188-196.
6. ТПРГ 1.1.3.09.1515-2018. Контроль состояния основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций с реакторной установкой ВВЭР-1000 в проектном сроке эксплуатации : типовая программа / Введена в действие приказом АО «Концерн Росэнергоатом» от 16.01.2019 №9/44-П // Разработана АО «ВНИИАЭС». – Москва : АО «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях», 2018.
7. РД ЭО 1.1.2.11.0571-2015 Нормы допускаемых толщин стенок элементов трубопроводов из углеродистых сталей при эрозионно-коррозионном износе : руководящий документ / Введен в действие приказом АО «Концерн Росэнергоатом» от 06.08.2015 №9/876-П // Разработан АО «ВНИИАЭС». – Москва : АО «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях», 2015.
8. Жуков, С. В. Способ определения механических напряжений и устройство для его осуществления. № 2001106509/28 : заявл. 05.03.2001; опубл. 27.12.2002 // С. В. Жуков, В. С. Жуков, Н. Н. Копица // Патент № 2195636. РФ, МПК G01L1/12 (2006.01).
9. Матвиенко, Ю. Г. Развитие моделей и критериев разрушения в современных проблемах прочности и живучести / Ю. Г. Матвиенко // Вестник научно-технического развития. – 2014. – № 7(83). – С. 48-51.
10. Новопашин М. Д. Градиентные критерии предельного состояния / М. Д. Новопашин, С. В. Сукнев // Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. – 2007. – № 4(54). – С. 316-319.
11. Адаменков, А. К. Обеспечение контроля термомеханической нагруженности узла приварки коллектора теплоносителя к патрубку Ду1200 парогенераторов ПГВ-1000 / А. К. Адаменков, И. Н. Веселова, И. В. Малахов // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – № 4(17). – С. 84-89.
12. Адаменков, А. К. Оценка эффективности эксплуатации устройства для снятия напряжений в коллекторе парогенератора ПГВ-1000 / А. К. Адаменков, И. Н. Веселова, И. В. Малахов // Атомная энергия. – 2017. – Том 123, № 2. – С. 79-80.

REFERENCES

- [1] Adamenkov A.K., Veselova I.N., Shpicer V.Y. Ocenka razvitiya erozionno-korozionnogo iznosa s pomoshchi metoda izmereniya magnitnoy anizotropii [Assessment of the Development of Erosion and Corrosion Wear Using the Method of Measuring Magnetic Anisotropy]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global Nuclear Safety]. 2019. №1(30). P. 113-119 (in Russian).
- [2] Aleksandrov A.V. Soprotivlenie materialov [Strength of Materials]. Moskva: Vysshaya shkola [Moscow: Higher School]. 2003. P. 380-383 (in Russian).
- [3] Konakova M.A., Volkov A.A., Yakovlev A.Y., Romancov C.V. Analiz vliyaniya razlichnikh faktorov na avariinie razrusheniya MG [Analysis of the Impact of Various Factors on the Emergency Destruction of MG]. Remont, vosstanovlenie, modernizaciya [Repair, Restoration, Modernization]. 2007. №6. P.7-12 (in Russian).
- [4] Hosford W.F. Mechanical Behavior of Materials. New-York: Cambridge University Press, 2005. 342 p.
- [5] Sosnin O.V., Nikitenko A.F., Gorev B.V. K obosnovaniyu energeticheskogo varianta teorii polzuchesti i dlitelnoy prochnosti metallov [To Substantiate the Energy Version of the Theory of Creep and Long-Term Strength of Metals]. Prikladnaya mekhanika i tehniceskaya fizika [Applied Mechanics and Technical Physics]. 2010. T.51, №4. P. 188-196 (in Russian).
- [6] ТПРГ 1.1.3.09.1515-2018. Kontrol sostoyaniya osnovnogo metalla, svarnykh soedinenii i naplavlennykh poverkhnostei oborudovaniya, truboprovodov i drugikh elementov atomnykh stantsii s reaktornoj ustanovkoi VVER-1000 v proektnom sroke ekspluatatsii. Tipovaya programma / Vvedena v deistvie prikazom AO «Kontsern Rosenergoatom» ot 16.01.2019 №9/44-P // Razrabotana AO «Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut po ekspluatatsii atomnykh elektrostantsii». Moskva. AO «Rossiiskii kontsern po proizvodstvu elektricheskoi i teplovoi energii na atomnykh stantsiyakh» [Monitoring the Condition of the Base Metal, Welded Joints and Weld

- Coated Surfaces of Equipment, Pipelines and Other Elements of Nuclear Power Plants with a WWER-1000 reactor in the Design Life: Standard Program / Enacted by order of Rosenergoatom Concern JSC dated 16.01.2019 No.9/44-P // Developed by JSC VNIIAES. Moscow: JSC Russian Concern for the Production of Electric and Thermal Energy at Nuclear Power Plants]. 2018 (in Russian).
- [7] RD EO 1.1.2.11.0571-2015 Normy dopuskaemykh tolshchin stenok elementov truboprovodov iz uglerodistykh staley pri erozionno-korroziionnom iznose. Rukovodyashchii dokument / Vveden v deistvie prikazom AO «Kontsern Rosenergoatom» ot 06.08.2015 №9/876-P // Razrabotan AO «Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut po ekspluatatsii atomnykh elektrostantsii». Moskva. AO «Rossiiskii kontsern po proizvodstvu elektricheskoi i teplovoi energii na atomnykh stantsiyakh» [Standards for Permissible Wall Thicknesses of Pipeline Elements Made of Carbon Steel in Case of Erosion and Corrosion Wear: a guideline / Enacted by order of Rosenergoatom Concern JSC dated 06.08.2015 No.9/876-P // Developed by JSC VNIIAES. Moscow: JSC Russian Concern for the Production of Electric and Thermal Energy at Nuclear Power Plants]. 2015 (in Russian).
- [8] Zhukov S.V., Zhukov V.S., Kopitsa N.N. Patent RF № 2195636. Russian Federation, MPK G01L1/12 (2006.01). Sposob opredeleniia mekhanicheskikh napriazhenii i ustroistvo dlia ego osushchestvleniia [Method for Determining Mechanical Stresses and a Device for its Implementation]. № 2001106509/28 : zayav 05.03.2001: opubl. 27.12.2002/ (in Russian).
- [9] Matvienko U.G. Razvitie modelei i kriteriev razrusheniya v sovremennikh problemakh prochnosti i zhivuchesti [Development of Fracture Models and Criteria in Modern Problems of Strength and Survivability]. Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya [Bulletin of Scientific and Technical Development]. 2014. №7(83). P.48-51 (in Russian).
- [10] Novopashin M.D., Suknev S.V. Gradientnye kriterii predelnogo sostoianiia [Gradient Limit State Criteria]. Vestnik SamGU. Estestvennonauchnaia seriia [SamSU Bulletin. Natural Science Series]. 2007. № 4(54). P. 316-319 (in Russian).
- [11] Adamenkov A.K., Veselova I.N., Malakhov I.V. Obespechenie kontrolya termomekhanicheskoy nagruzhennosti uzla privarki kollektora teplonositelya k patrubku Du1200 parogeneratorov PGV-1000 [Thermomechanical Stress Loading Monitoring of Welded Assembly of the Coolant Header of the Nozzle d1200 of Steam Generator PGV-1000]. Globalnaya yadernaya bezopasnost' [Global nuclear safety]. 2015. № 4(17). P. 84-89. (in Russian).
- [12] Adamenkov A.K., Veselova I.N., Malakhov I.V. Ocenka effektivnosti ekspluatatsii ustroistva dlya snyatiya napryazhenii v kollektore parogeneratora PGV-1000 [Evaluation of the Efficiency of Operation for Device to Relieve Stresses in the Progenerator's PGV-1000 Collector]. Atomnaya energiya [Atomic Energy]. 2017. № 2. P. 79-80 (in Russian).

Assessment of Stress-strain State of NPP Pipeline Metal Parts and Elements

A.K. Adamenkov^{*1}, I.N. Veselova^{**2}

**Rostov nuclear power plant, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

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

¹ORCID iD 0000-0001-7342-0231

WoS Researcher ID: O-1921-2018

e-mail: anri_61@mail.ru

²ORCID iD 0000-0001-5867-5690

WoS Researcher ID: M-1893-2018

e-mail: INVeselova@mail.ru

Abstract – As part of the experimental assessment of the stress-strain state of pipeline elements at the NPP using devices based on the magnetoanisotropic method, the criteria for the parameters of the main mechanical stress difference characterizing the increased probability of erosion and corrosion wear were obtained. It is determined that the high level of the main mechanical stress difference values in combination with the results of processing measurements on the parameters of the first derivative and the gradient of the main mechanical stress difference, depending on the scanning step in the grid nodes, are additional criteria for detecting a potentially dangerous area of erosion and corrosion wear.

Keywords: magnetoanisotropy, mechanical stress, gradient approach, derivative of stresses, local areas.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.039.54

ТОЛЕРАНТНОЕ ТОПЛИВО ДЛЯ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1200
С ВЫСОКОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ

© 2020 А.З. Альхмуд, В.Б. Круглов, Х.А. Танаш

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Основной фактор разрушения твэлов в авариях с потерей теплоносителя связан с пароциркониевой реакцией, протекающей между оболочкой твэла и теплоносителем (водой). Повышение надежности тепловыделяющих элементов можно получить модификацией или заменой топливной оболочки, на материалы не вступающие во взаимодействие с теплоносителем при нормальной эксплуатации и в аварийных ситуациях. Повышение надежности и экономических характеристик ЯЭУ возможна при замене диоксида урана на делящиеся композиции с большим содержанием делящихся изотопов и с большей теплопроводностью. Эти два положения образуют концепцию ATF (толерантного топлива). Рассмотрены варианты создания толерантного топлива. Для ядерно-энергетических установок с реакторами ВВЭР рассмотрены варианты модернизации оболочек и делящихся композиций.

Ключевые слова: толерантное топливо, теплопроводность, высокая температура, диоксид урана, цирконий, аварий с потерей теплоносителя связан с пароциркониевой реакцией.

Поступила в редакцию 03.06.2020

После доработки 15.10.2020

Принята к печати 20.10.2020

Введение

Во время аварии в 2011 г. на Фукусиме в Японии взорвался реактор. После этого инцидента возникла концепция толерантного топлива, включающая в себя разработку новых оболочек и самого топлива. В данном исследовании показана разница между урановым диоксидным UO_2 топливом и толерантным топливом, типа уран-циркониевый сплав U-Zr по распределению температуры топлива в активной зоне с изменением теплопроводности, и решена задача в авариях с пароциркониевой реакцией с использованием толерантного топлива [1].

Есть две причины этой аварии:

1. Физическая – в результате реакции циркония с водой выделилось большое количество водорода.
2. Механическая – отключение водяных насосов, ответственных за охлаждение влажного ядерного реактора, произошедшее в результате землетрясения и значительного повышения температуры в активной зоне реактора [2, с.177-183].

Расчет теплопроводности толерантного топлива U-Zr

Поведение ядерного топлива сильно зависит от теплофизических и химических свойств топливного материала и их изменения от температуры и выгорания. Более низкая теплопроводность приводит к большим температурным градиентам на топливной таблетке и высокой температуре в центре. Поэтому оценка теплофизических свойств диоксида урана (UO_2) требуется при проектировании ядерного реактора. Теплопроводность UO_2 рассчитывается по формуле (1) [3]:

$$\lambda_{UO_2}(t) = \frac{100}{7.5408 + 17.692 \times \frac{t+273}{1000} + 3.6142 \times \left(\frac{t+273}{1000}\right)^2} + \frac{6400}{5/2} \times e^{\frac{-16.35}{1000} \times \frac{t+273}{1000}}, \quad (1)$$

где λ – теплопроводность, Вт/М·К, $T = t + 273/1000^\circ\text{C}$.

Корреляция теплопроводности циркония в зависимости от температуры была разработана на основе статистического анализа теплопроводности циркония и измерений температуропроводности с 1951 г. по настоящее время. Рекомендуемое уравнение для теплопроводности циркония в Вт/М·К от 298 до 2000 К выглядит следующим образом (2) [4, 5]:

$$\lambda_{Zr}(t) = 8.8527 + 7.082 \times 10^{-3} \times (t+273) + 2.5329 \times 10^{-6} (t+273)^2 + 2.9918 \times 10^{-3} \times (t+273)^{-1}. \quad (2)$$

Теплопроводность толерантного топлива описывается с использованием следующих уравнений Хассельмана, Maxwell, McCullough и Rayleigh (3)-(7) [6]:

$$\lambda_{\text{хас}}(t) = \lambda_{Zr}(t) \times \frac{2 \left(\frac{\lambda_{UO_2}(t)}{\lambda_{Zr}(t)} - 1 \right) \times \nu + \frac{\lambda_{UO_2}(t)}{\lambda_{Zr}(t)} + 2}{\left(1 - \frac{\lambda_{UO_2}(t)}{\lambda_{Zr}(t)} \right) \times (-\nu) + \frac{\lambda_{UO_2}(t)}{\lambda_{Zr}(t)} + 2} \times (1-P)^{1.5}, \quad (3)$$

где λ – теплопроводность для толерантного топлива, Вт/М·К;

P – объемная доля пористости.

$$\lambda_{\text{Maxwell}}(t) = \lambda_{UO_2}(t) \times \left[1 + \frac{3 \cdot \nu}{\left(\frac{\lambda_{Zr}(t) + 2 \cdot \lambda_{UO_2}(t)}{\lambda_{Zr}(t) - \lambda_{UO_2}(t)} \right)^{-\nu}} \right]. \quad (4)$$

$$\lambda_{\text{McCullough}}(t) = [\lambda_{UO_2}(t) \times (\nu - P) + (1 - \nu) \times \lambda_{Zr}(t)]. \quad (5)$$

$$\lambda_{\text{Rayleigh}}(t) = \lambda_{UO_2}(t) \times \left(1 + \frac{3 \times \nu}{\left(\frac{\lambda_{Zr}(t) + 2 \cdot \lambda_{UO_2}(t)}{\lambda_{Zr}(t) - \lambda_{UO_2}(t)} \right)^{-\nu} + 1.596 \left(\frac{\lambda_{Zr}(t) - \lambda_{UO_2}(t)}{3 \lambda_{Zr}(t) - 4 \lambda_{UO_2}(t)} \right)} \right) \times (1-P)^{1.5}. \quad (6)$$

$$\lambda_{\text{average}}(t) = \frac{\lambda_{\text{хас}}(t) + \lambda_{\text{Maxwell}}(t) + \lambda_{\text{McCullough}}(t) + \lambda_{\text{Rayleigh}}(t)}{4}. \quad (7)$$

Решая эти уравнения в MATCAD, получаем результаты, показывающие влияние теплопроводности на температуру в активной зоне реактора. При увеличении теплопроводности за счет использования толерантного топлива температура будет снижаться по сравнению с топливом из диоксида урана. На рисунке 1 показана теплопроводность для толерантного топлива и диоксида урана [7, 8].

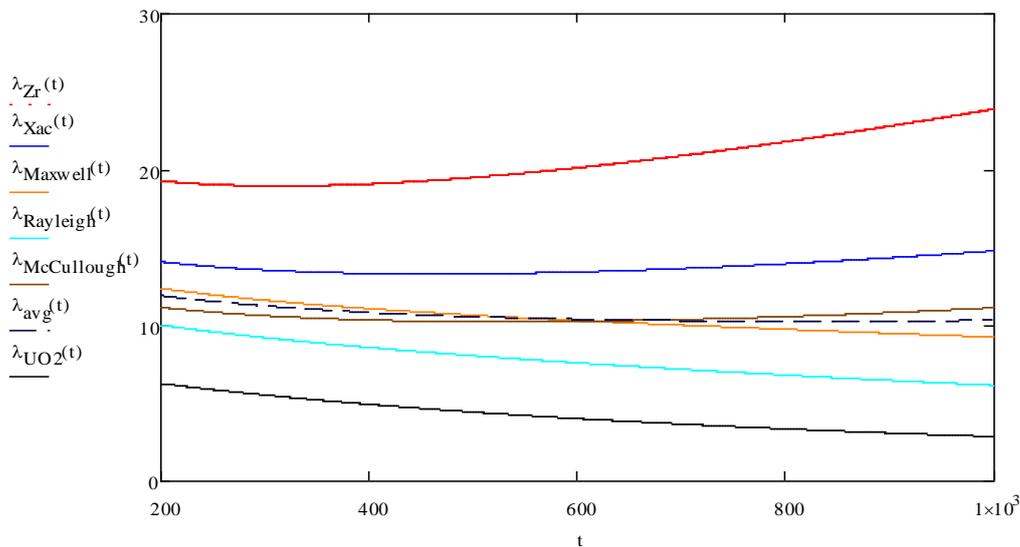


Рисунок 1 – Теплопроводность для толерантного топлива [Thermal conductivity for tolerant fuels]

Теплопроводность для толерантного топлива увеличилась до 9,6 Вт / М·К, а теплопроводность диоксида урана составляет 3 Вт /М·К. Это означает, что если теплопроводность увеличить, температура в реакторах будет снижаться [9, с. 84-88; 10].

Расчет распределение температуры топлива при использовании толерантного топлива U-Zr и диоксида урана UO₂ [10-12]

Примем коэффициент теплопроводности топлива и газового зазора, формула (8):

$$\lambda_{г.з.} = 0,35 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}, \lambda_{\text{пор}} = \lambda_{\text{топл}} \frac{1-P_{\text{пор}}}{1+0,5P_{\text{пор}}}, \text{ где } P_{\text{пор}} = 5\%. \quad (8)$$

Термическое сопротивление топлива, центрального отверстия нет, формула (9):

$$R_{\text{топл}} = \frac{d_{\text{топл}}}{4\lambda_{\text{пор}}}, \frac{\text{м}^2\text{К}}{\text{Вт}}. \quad (9)$$

Термическое сопротивление контактного слоя, формула (10):

$$R_{\text{кт}} = \frac{\delta_{г.з.}}{\lambda_{г.з.}} = \frac{0,1 \times 10^{-3}}{0,35} = 2,86 \times 10^{-4} \frac{\text{м}^2\text{К}}{\text{Вт}}. \quad (10)$$

Распределение температуры на поверхности топливной таблетки по высоте активной зоны для максимально напряженного канала, формула (11):

$$T_{\text{топ}}^{\text{пов}} = T_{\text{обmax}}(z) + q_{f\text{max}}(z)(R_{\text{об}} + R_{\text{кт}}). \quad (11)$$

Распределение температуры в центре топливной таблетки по высоте активной, формула (12):

$$T_{\text{топ}}^{\text{центр}} = T_{\text{тнmax}}(z) + q_{f\text{max}}(R_{\text{об}} + R_{\text{кт}} + R_{\text{топл}}). \quad (12)$$

На рисунке 2 показано распределение температуры топлива при использовании диоксида урана UO₂ топлива в активной зоне для реакторов ВВЭР-1200.

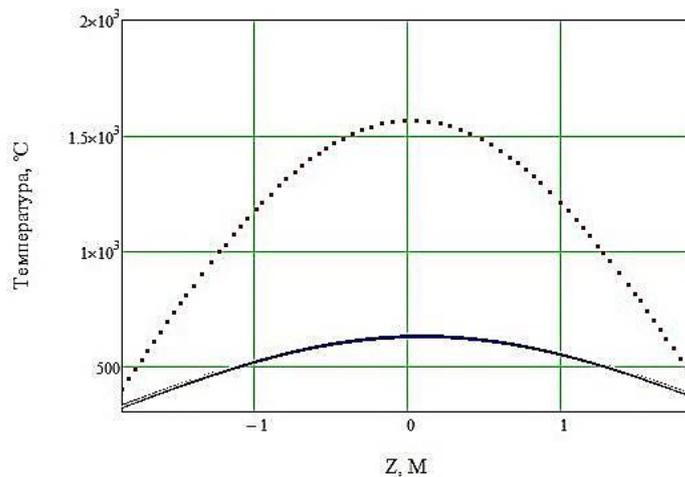


Рисунок 2 – Распределение температуры на поверхности топливной таблетки и температуры в центре топливной таблетки по высоте активной зоне [Distribution of temperature on the fuel pellet surface and temperature in the center of the fuel pellet over the height of the core]

Максимальная температура на поверхности топливной таблетки в максимально напряженном канале: $T_{\text{топ}}^{\text{пов}} = 678^{\circ}\text{C}$. Максимальная температура в центре топливной таблетки в максимально напряженном канале: $T_{\text{топ}}^{\text{цен}} = 1590^{\circ}\text{C}$.

На рисунке 3 показано распределение температуры топлива при использовании толерантного топлива U-Zr в активной зоне для реакторов ВВЭР-1200.

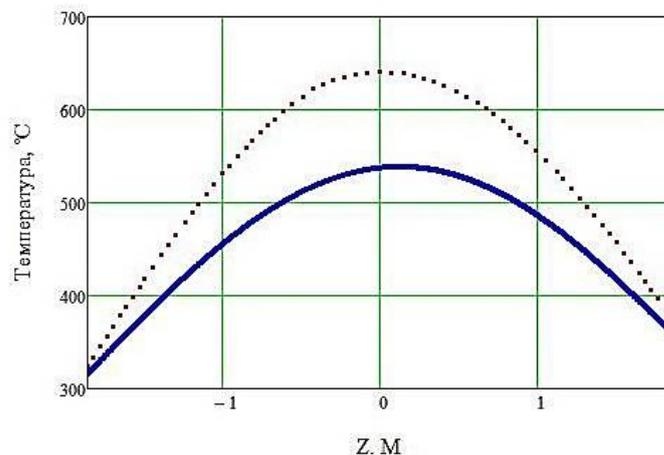


Рисунок 3 – Распределение температуры на поверхности топливной таблетки и температуры в центре топливной таблетки по высоте активной зоне [Distribution of temperature on the fuel pellet surface and temperature in the center of the fuel pellet over the height of the core]

Теплопроводность для толерантного топлива U-Zr увеличилась до $9,6 \text{ Вт} / \text{М}\cdot\text{К}$.

Максимальная температура на поверхности топливной таблетки в максимально напряженном канале: $T_{\text{топ}}^{\text{пов}} = 570^{\circ}\text{C}$. Максимальная температура в центре топливной таблетки в максимально напряженном канале: $T_{\text{топ}}^{\text{цен}} = 640^{\circ}\text{C}$.

Вывод

Толерантное топливо – ядерное топливо нового поколения безопасности с повышенной устойчивостью к авариям на АЭС с потерей теплоносителя в реакторе. По результатам расчетов показано распределение низких температур при использовании толерантного топлива. Водород начинает производиться при $500\text{-}700^{\circ}\text{C}$, но при достижении температуры 1200°C и выше оно становится опасным в реакторе. Толерантное топливо решает эту проблему. При остановке реактора толерантное топливо держит температуру оболочки в разрешенных пределах $500\text{-}700^{\circ}\text{C}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савченко, А. Толерантное топливо для реакторов типа ВВЭР / А. Савченко. – 01.02.2016. – URL : <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=6531&mode=thread&order=0&thold=0>.
2. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 / С. А. Андрушечко [и др.]. – Москва : Логос, 2010. – 604 с.
3. Zhou, W. Enhanced thermal conductivity accident tolerant fuels for improved reactor safety. A comprehensive review. *Annals of Nuclear Energy*. 2018. T. 119. P. 66-86.
4. Westinghouse «Accident-tolerant fuel», Cranberry Township, Pennsylvania 16066. – URL : <https://www.nrc.gov/docs/ML1826/ML18261A203.pdf>.
5. Jopek, H. and Streck, T. Optimization of the effective thermal conductivity of a composite. *Convection and Conduction Heat Transfer*, 2011, P. 197-214. – URL : [https://books.google.jo/books?hl=en&lr=&id=XoqfDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA197&dq=5.%09Jopek,+H.,+%26+Streck,+T.+\(2011\).+Optimization+of+the+effective+thermal+conductivity+of+a+composite.+Convection+and+Conduction+Heat+Transfer,+&ots=2TzHH2xYij&sig=SLuLap70nQI2Os8NzU5p6iY0XvM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.jo/books?hl=en&lr=&id=XoqfDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA197&dq=5.%09Jopek,+H.,+%26+Streck,+T.+(2011).+Optimization+of+the+effective+thermal+conductivity+of+a+composite.+Convection+and+Conduction+Heat+Transfer,+&ots=2TzHH2xYij&sig=SLuLap70nQI2Os8NzU5p6iY0XvM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false).
6. Pietra, K., Wisniewski, Tomasz S. A review of models for effective thermal conductivity of composite materials, *Journal of Power Technologies*, 95(1), 2015, P. 14-24. – URL : <http://papers.itc.pw.edu.pl/index.php/JPT/article/viewFile/463/637>.
7. White, J. T., Nelson, A. T., Dunwoody J. T., Byler, D. D., Safarik, D. J., McClellan, K. J. *Journal of Nuclear Materials*, V. 464, September 2015, P. 275-280. – URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.04.031>.
8. Touloukian, Y. S., Powell, R. W., Ho, C. Y., Klemens, P. G. *Thermophysical Properties of Matter*. IFI/Plenum, New York, 1970. – URL : [https://www.scirp.org/\(S\(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1168992](https://www.scirp.org/(S(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1168992).
9. Алексеев, С. В., Зайцев, В. А., Толстоухов, С. С. Дисперсионное ядерное топливо / С. В. Алексеев, В. А. Зайцев, С. С. Толстоухов. – Москва : ТЕХНОСФЕРА, 2015. – 248 с.
10. Savchenko, A. M., Konovalov, Y. V., Laushkin, A. V., Yuferov, O. I. Low-melting zirconium alloys. *Letters on Materials*, 2017, 7(3), P. 229-233.
11. Iwasaki, K., Matsui, T., Yanai, K., Yuda, R., Arita, Y., Nagasaki, T., Yokoyama, N., Tokura, I., Une, K., Harada, K. Effect of Gd₂O₃ Dispersion on the Thermal Conductivity of UO₂. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2009, P. 673-676.
12. Самойлов, О. Б. Безопасность ядерных энергетических установок / О. Б. Самойлов, Г. Б. Усынин, А. М. Бахметьев. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 278 с.

REFERENCES

- [1] Savchenko A. Tolerantnoe toplivo dlya reaktorov tipa VVE`R [Tolerant Fuel for WWER-Type Reactors]. 01.02.2016. URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=6531&mode=thread&order=0&thold=0> (in Russia).
- [2] Andrushechko S.A. [et al.]. AE`S s reaktorom tipa VVE`R-1000 [NPP with a WWER-1000 Type Reactor]. Moskva: Logos [Moscow: Logos], 2010. 604 p. (in Russia).
- [3] Zhou W. Enhanced Thermal Conductivity Accident Tolerant Fuels for Improved Reactor Safety. A Comprehensive Review. *Annals of Nuclear Energy*. 2018. T. 119. P. 66-86.
- [4] Westinghouse «Accident-tolerant fuel», Cranberry Township, Pennsylvania 16066. – URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML1826/ML18261A203.pdf>.
- [5] Jopek, H. and Streck, T. Optimization of the Effective Thermal Conductivity of a Composite. *Convection and Conduction Heat Transfer*, 2011, P. 197-214. – URL: [https://books.google.jo/books?hl=en&lr=&id=XoqfDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA197&dq=5.%09Jopek,+H.,+%26+Streck,+T.+\(2011\).+Optimization+of+the+effective+thermal+conductivity+of+a+composite.+Convection+and+Conduction+Heat+Transfer,+&ots=2TzHH2xYij&sig=SLuLap70nQI2Os8NzU5p6iY0XvM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.jo/books?hl=en&lr=&id=XoqfDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA197&dq=5.%09Jopek,+H.,+%26+Streck,+T.+(2011).+Optimization+of+the+effective+thermal+conductivity+of+a+composite.+Convection+and+Conduction+Heat+Transfer,+&ots=2TzHH2xYij&sig=SLuLap70nQI2Os8NzU5p6iY0XvM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false).
- [6] Pietra, K., Wisniewski, Tomasz S. A Review of Models for Effective Thermal Conductivity of Composite Materials, *Journal of Power Technologies*, 95(1), 2015, P. 14-24. – URL: <http://papers.itc.pw.edu.pl/index.php/JPT/article/viewFile/463/637>.
- [7] White, J. T., Nelson, A. T., Dunwoody J. T., Byler, D. D., Safarik, D. J., McClellan, K. J. *Journal of Nuclear Materials*, V. 464, September 2015, P. 275-280. – URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.04.031>.
- [8] Touloukian, Y. S., Powell, R. W., Ho, C. Y., Klemens, P. G. *Thermophysical Properties of Matter*. IFI/Plenum, New York, 1970. – URL : [https://www.scirp.org/\(S\(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1168992](https://www.scirp.org/(S(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1168992).

- [9] Alekseev S.V., Zaitsev V.A., Tolstoukhov S.S. Dispersionnoye yadernoye toplivo [Dispersive Nuclear Fuel]. Moskva : TEKHNOSEFERA [Moscow: TECHNOSPHERE]. 2015. P 84-88 (in Russia).
- [10] Savchenko, A. M., Konovalov, Y. V., Laushkin, A. V., Yuferov, O. I. Low-Melting Zirconium Alloys. Letters on Materials, 2017, 7(3), P. 229-233.
- [11] Iwasaki, K., Matsui, T., Yanai, K., Yuda, R., Arita, Y., Nagasaki, T., Yokoyama, N., Tokura, I., Une, K., Harada, K. Effect of Gd₂O₃ Dispersion on the Thermal Conductivity of UO₂. Journal of Nuclear Science and Technology, 2009, P. 673-676.
- [12] Samoilov O.B., Usynin G. B., Bakhmetyev A. M. Bezopasnost' yadernykh energeticheskikh ustanovok [Safety of Nuclear Power Installations]. Moskva : Energoatomizdat [Moscow: Energoatomizdat]. 1989. 278 p. (in Russia).

Tolerant Fuel for WWER-1200 Reactors with High Thermal Conductivity

A.Z. Alhmoud¹, V.B. Kruglov², H.A. Tanash³

National Research Nuclear University «MEPhI», Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409

¹ORCID iD: 0000-0002-8213-1455

e-mail: ahmad_homoud@yahoo.com

²e-mail: vbkruglov@mephi.ru

³e-mail: tanash_hamza@yahoo.com

Abstract – The main factor of destruction of fuel rods in accidents with loss of coolant is associated with the vapor-zirconium reaction occurring between the fuel rod shell and the coolant (water). Improving the reliability of fuel cells can be obtained by modifying or replacing the fuel shell, materials that do not interact with the coolant during normal operation and in emergency situations. Increasing the reliability and economic characteristics of nuclear power plants is possible by replacing uranium dioxide with fissile compositions with a high content of fissile isotopes and with greater thermal conductivity. These two provisions form the concept of ATF (tolerant fuel). Variants of creation of tolerant fuel are considered., variants of modernization of shells and fissile compositions are studied for nuclear power plants with WWER reactors.

Keywords: tolerant fuel, thermal conductivity, high temperature, uranium dioxide, zirconium, accidents with loss of coolant associated with water reaction.

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

УДК [351.862.82 : 005.5] : 621.039

**РЕАЛИЗАЦИЯ КОУЧИНГОВОГО ПОДХОДА ПРИ
ФОРМИРОВАНИИ, ПОДДЕРЖАНИИ И РАЗВИТИИ КУЛЬТУРЫ
БЕЗОПАСНОСТИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ГК «РОСАТОМ»**

© 2020 В.А. Руденко, Ю.А. Евдошкина, И.С. Василенко

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

Данная статья рассматривает возможность применения коучинга как инновационной и эффективной технологии управленческого взаимодействия с персоналом в ежедневной деятельности руководителей атомной станции. Представлены результаты диагностики развития навыков управления руководителями на Ростовской атомной станции. Полученные результаты исследования могут быть положены в основу стратегии формирования и повышения лидерства в вопросах культуры безопасности на предприятиях атомной отрасли.

Ключевые слова: культура безопасности, модель руководителя-лидера, тип управленческого взаимодействия, коучинг.

Поступила в редакцию 27.10.2020

После доработки 09.11.2020

Принята к публикации 13.11.2020

Принцип лидерства руководителей всех уровней в целях безопасности последовательно внедряется в ГК «Росатом» как один из основных инструментов деятельности. На предприятиях атомной отрасли, где обеспечение безопасности является основным приоритетом, существует необходимость постоянного усовершенствования процесса управления персоналом для достижения наилучших результатов деятельности. Анализируя мотивацию лидерства в области безопасности на всех уровнях организации, Томас Р. Краузе и его коллеги, работавшие более 20-ти лет над повышением уровня безопасности деятельности в более чем 1650 компаний, отметили, что «лидерство оказалось наиболее эффективным для повышения уровня безопасности в организации» [1].

Приказом АО «Концерн Росэнергоатом» №9/1133-П от 15.08.2019 г. внедрена модель руководителя – лидера в области развития культуры безопасности (документ для внутреннего пользования). Ее применение позволяет формировать и оценивать реальное поведение руководителей по отношению к достижению целей безопасности и эффективности. В задачах и поведенческих признаках в поддержку достижения ожидаемых результатов выделен особый тип управленческого взаимодействия руководителя с персоналом – «коучинг».

В своем первоначальном смысле английское слово coaching означает «транспортировка кого-то, перемещение из одного места в другое» [2]. Этот перевод хорошо передает основную суть коучинга – достижение заданных изменений в поведении человека. Фактически коучинг можно описать как партнерство между коучем (от английского coach) и его подопечным, коучи (ударение на последнем слоге, от английского coachee), с целью повышения его результативности, которое

достигается за счет повышения мотивации, изменения профессионального поведения и нахождения ответов на трудные вопросы.

Наличие различных определений [3-7] говорит прежде всего о комплексном характере коучинга, который трудно описать одной фразой. Перечислим наиболее важные особенности коучинга:

- состоит из серии диалогов между коучем и коучи;
- предполагает предоставление обратной связи сотруднику о его сильных и слабых сторонах, стиле, достижениях и проблемах и т.д.;
- предполагает, что сотрудник знает себя и может расширить это знание;
- решает конкретные вопросы, связанные с профессиональной деятельностью сотрудника;
- является недирективной формой развития, т.е. коуч не дает сотруднику инструкций, а помогает ему самому найти решения;
- направлен на повышение результативности, развитие навыков и/или повышение мотивации.

Внедрение принципов коучинга (рис. 1) в организации дает возможность руководителю быть лидером на базе компетентности, углубляет командное взаимодействие, строит доверительные отношения и систему обратной связи в команде.



Рисунок 1 – Принципы коучинга [Coaching principles]

Первый принцип коучинга – это равноправие, иначе говоря, партнерство. Равноправие создает благодатную почву для сотрудничества. Лидер координирует, направляет процесс, не являясь при этом доминирующей силой. Коучинг не ставит своей задачей учить сотрудника чему-нибудь и наставлять его «на путь истинный».

Второй принцип – вера в человека, его способности и возможности.

Третий – отсутствие экспертной оценки. Лидер не предлагает сотруднику готовых ответов и решений, сотрудник должен «дойти» до них сам. Когда человек принимает решение самостоятельно, он берет на себя ответственность за его выполнение и последствия. Лидер не должен давать советов, подход «если бы я был на Вашем месте, то...» в данном случае неприменим, он может лишь подтолкнуть сотрудника к очевидному, направлять его.

Четвертый принцип – принцип единства и взаимосвязи. Все сферы жизни человека взаимосвязаны. Если положительные изменения коснутся одной сферы, это непременно отразится на другой

Пятый, основной принцип – принцип мониторинга. Необходимо понимать, что лидера в первую очередь интересует настоящее и будущее сотрудника, чье внимание должно быть сосредоточено на поставленных целях

Большое влияние на социокультурную матрицу безопасности играет позиция лидера [8]. Одна из самых главных ролей лидера заключается в том, чтобы обучать своих людей. Осуществляя это, руководитель помогает сотрудникам принимать правильные решения, решать проблемы и устранять сложности. Они обретут новые навыки и знания, которые помогут им в осуществлении профессиональных задач в рамках культуры безопасности. Глубина и прочность усвоения способов и средств защиты от опасных и чрезвычайных ситуаций, развития умений и навыков безопасного поведения в различных условиях является основой снижения рисков [9, 10].

Проблема лидерства в вопросах культуры безопасности на объектах атомной энергетики выводит на новый качественный уровень подготовку персонала [11]. На Ростовской АЭС в рамках поддержания высокого уровня безопасности предприятия и формирования лидерства руководителей различных уровней в вопросах культуры безопасности в 2020 году преподаватели ВИТИ НИЯУ МИФИ провели два новых обучающих курса: «Модель поведения руководителя-лидера в развитии культуры безопасности» и «Поведенческий аудит. Наблюдение на рабочем месте. Коучинг».

С целью реализации практической части программы для 56-ти руководителей Ростовской АЭС были организованы следующие диагностические процедуры: диагностика навыков работы из разных управленческих ролей; тестирование по методике доктора психологических наук, профессора Р. Белбина; исследование локус контроля по методике Дж. Роттера.

Результаты исследований и их обсуждение с руководителями позволили составить общие рекомендации для развития навыков управления участников тренинговых занятий, возможностей применения коучингового подхода в деятельности руководителя на атомной станции, а также, в целом, оценить собственный потенциал в рамках концепции «лидер – руководитель».

Тестирование по методике «Групповые роли» позволило определить выраженность 8-ми ролевых поведенческих показателей руководителей: формальное лидерство (роль «председатель»); неформальное лидерство (роль «формирователь»); генерация идей (роль «генератор идей»); оценочная позиция (роль «критик»); организованность (роль «организатор работы»); взаимодействие внутри группы (роль «организатор группы»); внешние связи (роль «исследователь ресурсов»); ориентация на результат (роль «завершитель»).

В процессе анализа результатов тестирования выявлены следующие тенденции (рис. 2):

1. Наиболее высокими показателями у руководителей Ростовской АЭС стали средние значения по шкалам «Организованность» (7) и «Ориентация на результат» (8). Это значит, что все испытуемые владеют навыками организации своей деятельности и деятельности сотрудников своих подразделений. Также немаловажным является показатель ориентации на результат в работе, что проявляется в четком понимании цели деятельности, пути ее достижения и выполнения конкретных операций для этого. Данные показатели на высоком уровне являются обязательным требованием для эффективности руководителя.

2. Формальное и неформальное лидерство выражены на «среднем» и «выше среднего» уровнях, что показывает понимание необходимости совмещать «руководство по должности» и «лидерскую позицию» в коллективе сотрудников.

3. Однако, ориентация на взаимодействие внутри группы, т.е. в своем ближайшем коллективе, в подразделении выражено слабо. В связи с этим можно рекомендовать участникам развитие навыков и форм нерегламентированного общения, целью которого является не выполнение производственной задачи, а понимание мотивации, поддержка сотрудников в выполнении рабочих процедур.

4. Показатель генерации идей диагностирован на низком уровне, что не является критичным для данной отрасли. Деятельность руководителей и сотрудников на атомной станции всегда была и будет строго регламентированной с целью обеспечения необходимого уровня безопасности, поэтому низкие показатели по данному критерию являются скорее необходимой нормой.

5. Показатель «Оценочная позиция» в результатах группы занимает верхнюю границу «нормы». Данный показатель свидетельствует об уровне ориентации на оценку результатов деятельности и навыков людей, которые ее выполняют, а это первая и прямая обязанность руководителя любой отрасли. В связи с этим, участникам группы можно рекомендовать развивать оценочную позицию.

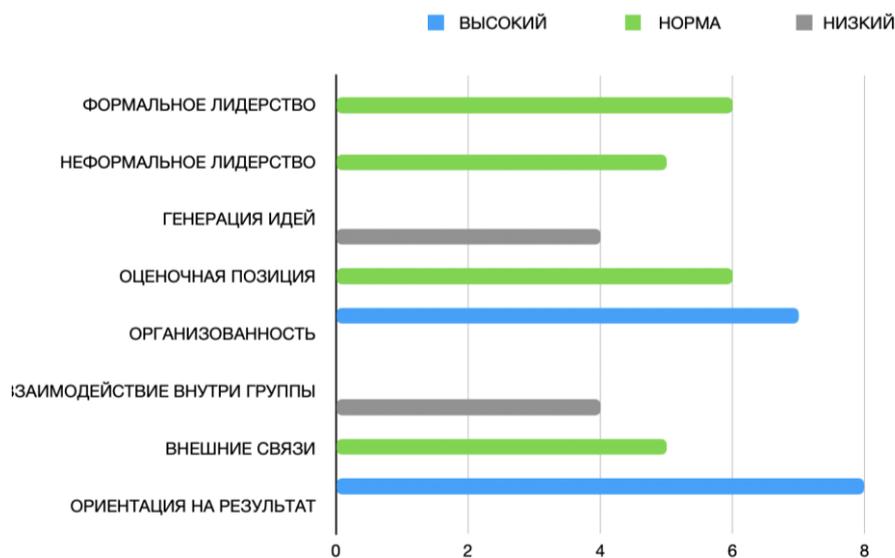


Рисунок 2 – Результаты теста «Групповые роли» [Results of the «Group Roles» test]

Представленная гистограмма отражает средние показатели группы тестируемых руководителей Ростовской АЭС. Каждый участник исследования получил свои индивидуальные результаты и мог задать вопросы тренеру по сочетаниям индивидуальных показателей, особенностей их проявления в деятельности и методам развития управленческих навыков.

Диагностика локус контроля (приписывания успехов или неудач только внутренним или только внешним факторам) по методике Дж. Роттера позволила определить уровень интернальности сразу по 7-ми направлениям: общий уровень интернальности; в области достижений; в области неудач; в семейных, производственных и межличностных отношениях, в области здоровья. Как известно люди с высоким уровнем интернальности присваивают ответственность за результаты в полной мере себе, не ссылаясь и не указывая в качестве причин произошедшего обстоятельства или действия окружающих. Личность с экстернальным типом характера, наоборот склонна искать причины и объяснения во внешней среде.

По результатам анализа теста Роттера нами не обнаружено ни одного руководителя с экстернальным типом личности (рис. 3).

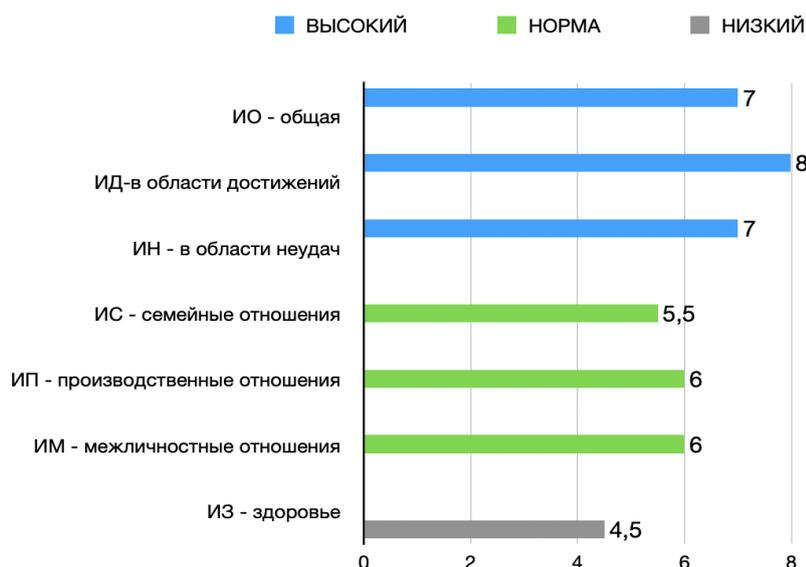


Рисунок 3 – Средние значения Локус контроля в группе [Average values of Locus Test in the group]

Анализируя данные можно увидеть закономерность, что наиболее высокие показатели по интернальности в шкалах «Область достижений» и «Область неудач», которые напрямую отвечают за внутреннюю оценку результатов деятельности. Следовательно, испытуемые наиболее требовательны к себе в области производственных задач.

Наблюдается тенденция снижения уровня интернальности до среднего в 3-х шкалах, которые описывают отношения с другими людьми. Такое положение дел в комментариях участников связано с долей «неизвестности» внутреннего мира другого участника коммуникации.

Особенно интересными становятся низкие показатели по интернальности в области здоровья, которые свидетельствуют о снятии с себя ответственности за состояние собственного самочувствия. Данный показатель зафиксирован ниже нормы у 90% опрошенных, что стало предметом отдельного обсуждения с участниками тренинга. В качестве вероятных причин, можно выделить меньшее внимание к показателю потому, что вся отрасль атомной энергетики ориентирована на своевременную диагностику состояния здоровья каждого сотрудника в плановом режиме, что, безусловно, снижает риски. Необходимо отметить, что большая часть групп проходила тестирование до ситуации, связанной с новой коронавирусной инфекцией (COVID-19). Однако, в группе, которая проходила тестирование в ноябре 2020 г. (пик ситуации, связанной с пандемией) средние показатели интернальности в области здоровья были в норме, ближе к высоким, что, безусловно, связано с необходимостью соблюдения мер профилактики распространения новой коронавирусной инфекцией (COVID-19).

В программах тренинговых занятий использованы теории, рекомендуемые Е.В. Сидоренко (кандидата психологических наук, бизнес-тренера, коуча), озвученные в докладе на VIII Международной школе по культуре безопасности 2019 г.:

1. Теория лидерских функций «ЦЕНТР».
2. Типы организационной культуры R.E. Quinn, K.S. Cameron.
3. Виды приверженности к организационной культуре К. Нордстрем, Й. Риддерстрале.

В ходе тренинговых занятий изучение данного материала было построено через практику работы в малых группах, использованы методы группового анализа и обсуждения, а также метод самооценки. В результате такой работы были получены мнения участников программы обучения по ряду важных вопросов.

Руководители Ростовской АЭС оценивали выраженность функций руководителя-лидера в своем коллективе, присваивая значения каждой функции в баллах от 1-10-ти. Оценке подлежали функции, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Содержание функций руководителя [Content of the manager's functions]

ФУНКЦИЯ	СОДЕРЖАНИЕ
Цель	Умение создавать видение и формулировать четкие цели.
Единство	Умение создавать команду единомышленников и эффективно взаимодействовать с ней.
Настрой	Умение оказывать вдохновляющее, мотивирующее воздействие.
Труд	Умение ежедневно работать так, чтобы соответствовать своим целям, идеям и принципам.
Ресурсы	Умение принимать обоснованные и твердые решения по поводу людей, энергии, времени и иных ресурсов.

Результаты самооценки функций показали, что опрошенные руководители высоко оценивают выраженность данных функций в своей работе. Наибольшие дискуссии вызвала функция «Ресурсы», связанная авторами теории с возможностью принимать твердые и обоснованные решения по поводу людей, энергии и т.д. (рис. 4).



Рисунок 4 – Оценка выраженности лидерских функций [Assessment of leadership functions expressiveness]

Рассматривая роль лидера-руководителя, участники оценили выраженность следующих видов приверженности к организационной культуре по К. Нордстрем, Й. Риддерстрале:

Отношения – привязанность к людям, коллегам, подчиненным, руководителю или к месту работы;

Долг – связанность моральными обязательствами по отношению к конкретным людям в организации;

Расчет – привязанность к организации, обусловленная соображениями выгоды;

Верность самому себе – верность своим нематериальным интересам, своему предназначению и жизненным ценностям.

Средние оценки 36-ти опрошенных руководителей Ростовской АЭС каждого из видов приверженности показаны на рисунке 5.

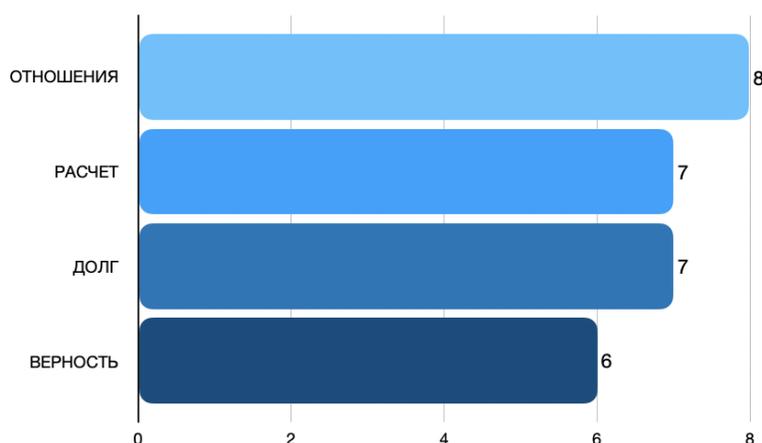


Рисунок 5 – Оценки видов приверженности организационной культуре [Assessments of organizational culture commitment types]

Такое распределение баллов, указывает на оценку корпоративной культуры участниками как «Формализованный закрытый тип культуры» по типологии R.E. Quinn, K.S. Cameron (рис. 6).



Рисунок 6 – Типы организационной культуры [Types of organizational culture]

Большое количество практических упражнений, групповые дискуссии, позволили рассмотреть блоки теории в более интересной, интерактивной форме для участников. В такой работе руководители чувствуют постоянную связь рассматриваемого материала с их реальной ситуацией, деятельностью в организации. Проведенные исследования подчеркивают значимость ценностей и ценностных ориентаций личности работника АЭС, это обусловлено тем, что ценностные ориентации – важнейшая составляющая структуры личности, включающая мотивационный, отношенческий, когнитивный, эмоциональный и оценочный компоненты [12-14]. Использование коучингового

подхода представляет собой наиболее гибкий, предполагающий свободный выбор, а, следовательно, всесторонний учёт индивидуальных интересов и потребностей персонала.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что процесс формирования лидерства в культуре безопасности должен быть ориентирован на формирование модели и личностного стиля поведения специалистов, которые способствуют повышению уровня безопасности при эксплуатации АЭС. При этом за основу берутся требования к руководителям (лидерам) отрасли, Устава, Кодекса этики и политик, «Модели руководителя-лидера» с поведенческими индикаторами для оценки результативности работы лидеров по формированию и развитию культуры безопасности. Полученные результаты могут быть положены в основу стратегии формирования и повышения уровня культуры безопасности на предприятиях атомной энергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краузе, Томас Р. Мотивация лидерства в области безопасности на всех уровнях организации: три важных аспекта. – HR-Portal, 2005. – URL : <https://hr-portal.ru/article/motivaciya-liderstva-v-oblasti-bezopasnosti-na-vseh-urovnyah-organizacii-tri-vazhnyh-aspekta>.
2. Коучинг как инструмент развития менеджеров / Рекрутинговое агентство «КАУС». – URL : <https://www.kaus-group.ru/knowledge/300-articles/category/motivation/material/438/>.
3. Сейсекенова, М. Б. Коучинг как новое направление в управлении организацией / М. Б. Сейсекенова, Э. О. Кыдырбаева // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. – 2018. – № 3. – С. 32-35. – URL : <https://e.lanbook.com/journal/issue/308193> (дата обращения: 08.09.2020).
4. Липатова, С. Д. Коучинг как инновационный стиль управления персоналом / С. Д. Липатова // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2018. – № 10. – С. 28-33. – URL : <https://e.lanbook.com/journal/issue/310401> (дата обращения: 08.09.2020).
5. Ковалев, В. И. Коучинг как инновационный стиль менеджмента персонала в современном глобализированном обществе / В. И. Ковалев, К. А. Хатимлянская // Науковедение. – 2015. – Т. 7., № 6(31). – С. 49.
6. Бергаль, О. Е. Коучинг как наиболее эффективная технология управления персоналом / О. Е. Бергаль // Восточно-европейский научный журнал. – 2015. – Т. 4. – № 3. – С. 37-40.
7. Зиновьева, Е. А. Коучинг как системный метод управления организационным поведением в современной организации / Е. А. Зиновьева, О. Н. Михайлова, Е. Н. Федина // Казанский социально-гуманитарный вестник. – 2016. – № 1(18). – С. 12-16.
8. Евдошкина, Ю. А. Теоретико-методологические проблемы изучения единой социокультурной матрицы культуры безопасности персонала и населения зоны расположения АЭС / Ю. А. Евдошкина // Гуманитарий Юга России. – 2018. – Т. 7. – № 3. – С. 111-119.
9. Руденко, В. А. Культура безопасности как интегральный элемент в формировании профессиональных компетенций работников АЭС / Руденко В. А., Евдошкина Ю. А., Железнякова А. В., Жук А. В. // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 2(23). – С. 104-110.
10. Лобковская, Н. И. Профессиональное целеполагание как составляющая культуры безопасности будущего специалиста-атомщика [Электронный ресурс] / Н. И. Лобковская, Ю. А. Евдошкина // Современное образование. – 2017. – № 1. – С. 32-38. – URL : http://e-notabene.ru/pp/article_22498.html (дата обращения: 01.10.2020).
11. Василенко, И. Н. Лидерство в культуре безопасности и вопросы его формирования в вузе, ориентированном на подготовку специалистов для атомной отрасли / И. Н. Василенко, Ю. А. Евдошкина, В. А. Руденко // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 3(32). – С. 127-136.
12. Руденко, В. А. Ситуативно-личностные факторы организационной и профессиональной приверженности культуре безопасности студентов-атомщиков / В. А. Руденко, Н. И. Лобковская, Ю. А. Евдошкина // Глобальная ядерная безопасность. – 2018. – № 3(28). – С. 87-97.
13. Лобковская, Н. И. К вопросу об инновационном потенциале студентов отраслевых вузов-партнеров ГК «Росатом» / Н. И. Лобковская, А. В. Железнякова, А. Н. Неборубов // Глобальная ядерная безопасность. – 2020. – № 1(34). – С. 116-124.

14. Системный подход к оценке корректирующих мероприятий для формирования культуры безопасности в атомной отрасли / В. А. Руденко, В. Д. Ожерельев, Ю. А. Евдошкина, О. Ф. Цуверкалова, А. Н. Сетраков // Глобальная ядерная безопасность. – 2020. – № 3(36). – С. 85-94.

REFERENCES

- [1] Krause Thomas R. Motivatsiya liderstva v oblasti bezopasnosti na vseh urovnyakh organizatsii: tri vaznykh aspekta [Motivating Safety Leadership at All Levels of the Organization: Three Important Aspects]. HR-Portal, 2005. URL: <https://hr-portal.ru/article/motivatsiya-liderstva-v-oblasti-bezopasnosti-na-vseh-urovnyah-organizatsii-tri-vaznykh-aspekta> (in Russian).
- [2] Kouching kak instrument razvitiya menedzherov [Coaching as a tool for the development of managers]. Rekrutirovayemye agentstvo «KAUS» [Recruiting agency «KAUS»]. URL: <https://www.kaus-group.ru/knowledge/300-articles/category/motivation/material/438/> (in Russian).
- [3] Seisekenova M.B., Kydyrbaeva E.O. Kouching kak novoye napravleniye v upravlenii organizatsiyey [Coaching as a New Direction in Organization Management]. Vestnik Kyrgyzsko-Rossiyskogo slavyanskogo universiteta [Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University]. 2018. No.3. P. 32-35. URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/308193> (in Russian).
- [4] Lipatova S.D. Kouching kak innovatsionnyy stil' upravleniya personalom [Coaching as an Innovative Style of Personnel Management]. Intellect. Innovatsii. Investitsii [Intellect. Innovation. Investments]. 2018. No.10. P.28-33. URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/310401> (in Russian).
- [5] Kovalev V.I., Khatimlyanskaya K.A. Kouching kak innovatsionnyy stil' menedzhmenta personala v sovremennom globalizirovannom obshchestve [Coaching as an Innovative Style of Personnel Management in a Modern Globalized Society]. Naukovedeniye [Science Studies]. 2015. Vol.7. No.6(31). P.49 (in Russian).
- [6] Bergal O.E. Kouching kak naiboleye effektivnaya tekhnologiya upravleniya personalom [Coaching as the Most Effective Technology for Personnel Management]. Vostochno-yevropeyskiy nauchnyy zhurnal [East European Scientific Journal]. 2015. T.4. No.3. P.37-40 (in Russian).
- [7] Zinovieva E.A., Mikhailova O.N., Fedina E.N. Kouching kak sistemnyy metod upravleniya organizatsionnym povedeniyem v sovremennoy organizatsii [Coaching as a Systematic Method of Managing Organizational Behavior in a Modern Organization]. Kazanskiy sotsial'no-gumanitarnyy vestnik [Kazan Social and Humanitarian Bulletin]. 2016. No.1(18). P.12-16 (in Russian).
- [8] Evdoshkina Yu.A. Teoretiko-metodologicheskiye problemy izucheniya yedinoy sotsiokul'turnoy matritsy kul'tury bezopasnosti personala i naseleniya zony raspolozheniya AES [Theoretical and Methodological Problems of Studying the Unified Socio-Cultural Matrix of the Safety Culture of Personnel and Population in the Area of the NPP]. Gumanitarniy Yuga Rossii [Humanitarians of the South of Russia]. 2018. Vol.7. No.3. P.111-119 (in Russian).
- [9] Rudenko V.A., Evdoshkina Yu.A., Zheleznyakova A.V., Zhuk A.V. Kul'tura bezopasnosti kak integral'nyy element v formirovaniy professional'nykh kompetentsiy rabotnikov AES [Safety culture as an Integral Element in the Formation of Professional Competencies of NPP Workers]. Global'naya yadernaya bezopasnost [Global Nuclear Safety]. 2017. No.2(23). P.104-110 (in Russian).
- [10] Lobkovskaya N.I., Evdoshkina Yu.A. Professional'noye tselepolaganiye kak sostavlyayushchaya kul'tury bezopasnosti budushchego spetsialista-atomshchika [Professional goal-setting as a component of the safety culture of a future nuclear specialist]. Elektronnyy resurs [Electronic resource]. Sovremennoye obrazovaniye [Modern education]. 2017. No.1. P.32-38. URL: http://e-notabene.ru/pp/article_22498.html (in Russian).
- [11] Vasilenko I.N., Evdoshkina Yu.A., Rudenko V.A. Liderstvo v kul'ture bezopasnosti i voprosy yego formirovaniya v vuze, oriyentirovannom na podgotovku spetsialistov dlya atomnoy otrasli [Leadership in the safety culture and issues of its formation in a university focused on training specialists for the nuclear industry]. Global'naya yadernaya bezopasnost [Global Nuclear Safety]. 2019. No.2(32). P.127-136 (in Russian).
- [12] Rudenko V.A., Lobkovskaya N.I., Evdoshkina Yu.A. Situativno-lichnostnyye faktory organizatsionnoy i professional'noy priverzhennosti kul'ture bezopasnosti studentov-atomshchikov [Situational and Personal Factors of Organizational and Professional Commitment to Safety Culture of VETI NRNU "MEPhI" Nuclear Energy Department Students]. Global'naya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety]. 2018. No.3(28). P.87-97 (in Russian).
- [13] Lobkovskaya N.I., Zheleznyakova A.V., Neborubov A.N. K voprosu ob innovatsionnom potentsiale studentov otraslevykh vuzov-partnerov GK «Rosatom» [Issue of the Innovative Potential of Students of Branch Universities-Partners of the State Corporation «Rosatom»]. Global'naya yadernaya bezopasnost [Global Nuclear Safety]. 2020. No.1(34). P.116-124 (in Russian).

- [14] Rudenko V.A., Ozhereliev V.D., Evdoshkina Yu.A., Tsuverkalova O.F., Setrakov A.N. Sistemnyy podkhod k otsenke korrekiruyushchikh meropriyatiy dlya formirovaniya kul'tury bezopasnosti v atomnoy otrasli [A Systematic Approach to Evaluating Corrective Actions to Create Safety Culture in Nuclear Industry]. Global'naya yadernaya bezopasnost [Global Nuclear Safety]. 2020. No.3(36). P.85-94 (in Russian).

Implementation of Coaching Approach to Formation, Maintenance and Development of Safety Culture at the «Rosatom» State Corporation Enterprises

V.A. Rudenko¹, Yu.A. Evdoshkina², I.S. Vasilenko³,

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

¹ *ORCID iD: 0000-0002-6698-5469*

WoS Researcher ID: B-7730-2016

e-mail: VARudenko@mephi.ru

² *ORCID iD: 0000-0002-6704-0643*

WoS Researcher ID: G-8379-2017

e-mail: YAEvdoshkina@mephi.ru

³ *ORCID iD: 0000-0002-2588-8283*

e-mail: isv.trener@gmail.com

Abstract – The paper considers the possibility of using coaching as an innovative and effective technology for managerial interaction with personnel in the daily activities of the nuclear power plant leaders. The results of diagnostics of the development of management skills of managers at the Rostov nuclear power plant are presented. The obtained results of the study can be used as the basis for the strategy of forming and increasing leadership in matters of safety culture at the enterprises of the nuclear industry.

Keywords: safety culture, leader-leader model, type of management interaction, coaching.

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

УДК [51 : 004] : 621.039

**ОСОБЕННОСТИ КАЧЕСТВЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ
ПОДГОТОВКИ В УСЛОВИЯХ ОНЛАЙН-ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ,
ОРИЕНТИРОВАННЫХ НА РАБОТУ В АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

© 2020 Н.П. Василенко, Н.И. Чабанова

Волгодонский инженерно-технический институт НИЯУ МИФИ, Волгодонск, Ростовская обл., Россия

Из-за пандемии коронавирусной инфекции COVID-19 мир столкнулся с необходимостью социальной изоляции и вынужденного стремительного перехода на «домашний офис» и онлайн обучение. Российская система образования почти полностью перешла на дистанционную форму обучения. Работа в новых условиях перевернула ежедневную рутину как преподавателей, так и студентов, которые не только столкнулись со сложностями различного характера, но и открыли для себя новые возможности профессионального роста. Традиционно принято обсуждать недостатки дистанционного образования, но в данной работе мы рассмотрим преимущества и новые открывшиеся возможности данной формы обучения. Особенно это важно в процессе математической подготовки студентов вузов, ориентированных на работу в атомной отрасли из-за специфики изучения данного предмета и в силу того, что в настоящее время онлайн-обучение широко внедряется и в подготовке сотрудников атомных станций, где цифровизация и все, что связано с технологиями удаленного доступа, благодаря пандемии оказались востребованы и незаменимы.

Ключевые слова: онлайн-обучение, подготовка специалистов для атомной отрасли, программа Zoom, математическая подготовка студентов.

Поступила в редакцию 12.10.2020

После доработки 09.11.2020

Принята к публикации 13.11.2020

Из-за пандемии коронавирусной инфекции COVID-19 2020 г. для ГК «Росатом», как и для ядерной отрасли всего мира, обеспечивающей энергетическую стабильность мировой экономики, стал непростым. Это затронуло и систему повышения квалификации и переподготовки работников АЭС, которая ранее проводилась только в очном формате, а ныне подверглась коррекции из-за невозможности проведения очных семинаров и обучающих курсов. Как отмечает С. Локтионов, руководитель программы «Отраслевое обучение и развитие» ВАО АЭС-МЦ «в условиях существующих эпидемиологических ограничений ВАО АЭС решила ускорить перевод этих важных курсов на «дистанционные рельсы» [1].

Кроме того, в Годовом докладе МАГАТЭ за 2019 год отмечается, что спомощью учебной киберплатформы для сетевого образования и подготовки кадров (CLP4NET) Агентства было проведено свыше 650 курсов для подготовки кадров и получения образования в режиме он-лайн [2]. В 2020 году МАГАТЭ предлагает целый ряд курсов дистанционного онлайн-обучения, которые «охватывают широкий круг тем: от ядерной энергии до безопасности и физической безопасности; и от гарантий до ядерных технологий и применений» [3].

По мнению многих руководителей АО «Концерн Росэнергоатом»: в настоящее время «критически важно обеспечивать удаленный доступ к информации, процессам

поддержки принятия решений, влиять на решения, находясь в любой точке» и «опыт, полученный в стрессовой ситуации пандемии, и переход на дистанционную работу являются востребованными в сегодняшней работе отрасли», так как в настоящее время даже экспертизы в пилотных проектах проводятся онлайн [4, 5]. Но удаленный опыт работы и обучения работников отрасли показал, что им было тяжело отделить домашнюю рутину от производственных задач «Человек, который дома работает за компьютером, поневоле вовлечен и в производство, и в воспитание детей, и в закупку продуктов, и во все домашние процессы. Подозреваю, что если на одной чаше весов стресс-сценарий, по которому надо заполнить таблицу, и остывающий обед на другой, то нередко побеждает обед» [4]. Тогда, что же говорить о студентах, у которых еще больше обязанностей и соблазнов в период удаленного, домашнего обучения. Поэтому перед преподавателями вузов, готовящих студентов для работы в атомной отрасли повышается уровень ответственности за организацию онлайн-обучения по формированию компетенций не только в предметной области, но и в умении учиться в новой реальности.

Для ВИТИ НИЯУ МИФИ это особенно важно, так как все направления и специальности подготовки студентов входят в структуру потребностей организаций ГК «Росатом» в наборе выпускников по специальностям (усредненные значения по 2018-2027 годам /Специальность и Доля в общем наборе, %): Электроэнергетика и электротехника 7,7; Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг 6,8; Теплоэнергетика и теплотехника 5,2; Ядерная энергетика и теплофизика 4,3; Строительство 4,2; Информатика и вычислительная техника 3,1; Информационные системы и технологии 2,0; Машиностроение 1,9 [6].

Одним из актуальных подходов в реальность коронавирусной инфекции COVID-19, когда студенты обучаются и очно и дистанционно стало смешанное обучение и особенно внедрение новых форм смешанного обучения, повышающих его эффективность, таких как: перевернутый класс, ротация станций, ротация лабораторий и гибкая модель, при этом учитываются факторы, которые влияют на эффективность обучения: персонализация; модель полного усвоения; среда высоких ожиданий; личная ответственность за результаты обучения; проектная работа; групповая деятельность [7].

Обращаясь к мировым практикам внедрения технологий обучения и практикам обучения инженерным наукам с помощью применения современных технологий, и организации инженерных курсов в период пандемии по проблемам: «Образовательные технологии будущего: что ждет инженерные и вычислительные науки в ближайшие 10 лет» (опыт экспертов из Финляндии, Хорватии и Франции); «Каким будет инженерное образование будущего?» (опыт Тин-Чэн Понга, профессора Гонконгского университета науки и технологий); «Неспособность к изменениям: почему только с помощью технологий нельзя изменить образование?» (опыт Джастина Рейха, профессора Массачусетского технологического института); «Дидактика будущего: как цифра изменит преподавание» (Пита Коммерса, профессора Университета Твенте, Нидерланды) и др., мы также выделили наиболее эффективные техники, технологии и программные средства современного онлайн-обучения [8].

Кроме того, анализ зарубежного и отечественного опыта, опросов и рекомендаций по проблеме эффективного перехода в дистанционное обучение, эффективности различных видов онлайн-обучения, и на основе собранной доказательной базы позволил авторам сделать вывод о том, что успешные результаты достигаются только при слиянии нескольких факторов, таких как педагогический дизайн, обучающий контекст, используемые технологии (цифровые и педагогические) [9]. Большой опыт в организации онлайн-курсов и в нашей стране,

подтверждением чему служит федеральный портал «Современная цифровая образовательная среда в РФ» где размещено 1373 курса, разработанных преподавателями 81 вуза на 48 платформах [10].

Но в нашей статье, мы будем рассматривать наиболее эффективные подходы к организации онлайн-обучения студентов, подкрепляя примерами из опыта преподавания математических дисциплин в вузе на платформе Zoom. Основу формирования данного опыта составил анализ исследований по внедрению электронного обучения в вузах всего профессионального сообщества.

Одним из фундаментальных исследований по теме «Обучение в новой нормальности: вызовы и ответы» является аналитический отчёт авторского коллектива, представленный «исследованием способов и методов организации и проведения обучения в условиях глобальной эпидемии COVID-19. По итогам проведенного исследования авторы сделали выводы о том, что:

а) в настоящее время началось активное изучение современных образовательных технологий и возможностей их применения, в том числе путём обмена опытом между участниками образовательного процесса;

б) образовательный рынок услуг предоставляет разработчикам и преподавателям образовательных программ широкий спектр образовательных подходов, технологий и приложений для создания образовательного опыта, но более качественную интеграцию электронных инструментов в образовательный процесс позволит глубокое изучение преподавателем небольшого количества инструментов и использование всего функционала, предоставляемого данными инструментами;

в) опросы студентов показали, что им не хватает традиционного посещения университетов, так как онлайн-формат ограничивает живое взаимодействие между студентами в процессе обучения, а также во внеурочное время и живое участие студентов в спортивной, культурной и социальной жизни университета [11].

Особо следует обратить внимание на исследования и обобщения по проблеме вовлеченности студентов в образовательный процесс, в котором выделены препятствия в обучении: недостаток концентрации обучающихся, негативный прошлый опыт обучения; мысленные установки; недостаток технических навыков; изоляция и скука.

В анализе следующего исследования мы обратились к Telegram-каналам как современной платформе для быстрого распространения и обмена информацией, в которых можно найти полезные статьи по интересующей тематике, анонсы вебинаров и профильных конференций, а также напрямую пообщаться с экспертами отрасли. Один из наиболее популярных Telegram-каналов про дистанционное обучение (по рейтингам e-learningcenter.ru, ispring.ru, medium.com/@g.likhobabin) – это авторский «Живое обучение» (<https://t.me/prolearning> – по состоянию на сентябрь 2020 у канала почти 4000 подписчиков), где подробно разбирается вопрос внедрения и развития дистанционного обучения, рассказывается о форматах дистанционного обучения, особенностях разработки электронных курсов, метриках и ключевых показателях в обучении [12].

Мы проанализировали 153 поста (которые были прочитаны 214205 раз) данного Telegram-канала за период с января по сентябрь 2020 г. с помощью методов интеллектуального анализа текста (машинного обучения). Для наглядного представления данных мы воспользовались программой «Облако слов» как визуальное представление ключевых слов, при котором важность каждого ключевого слова или фразы обозначается размером шрифта: ключевые слова, имеющие больший вес, отображаются в облаке слов более крупным шрифтом и построили облако наиболее часто встречающихся слов в отзывах и характеристиках онлайн-обучения (рис. 1).



Рисунок 1 – Облако наиболее часто встречающихся слов при отношении студентов к онлайн-обучению
 [A cloud of the most common words when students relate to online learning]

Из облака слов видно, что профессиональное сообщество в этом году интересуют методологические аспекты преподавания: наиболее важные ключевые слова – это «знание», «материал», «исследование», «учебный материал», «изменение», «обратная связь», «геймификация». Кроме того, очевидно, в настоящее время особенно актуальным является вопрос эффективности дистанционного обучения, что подтверждают следующие достаточно популярные ключевые слова: «удаленная работа», «онлайн», «электронное обучение», «новое поведение», «технология», «экранное время», «контент», «электронный».

Таким образом, анализ публикаций в популярном Telegram-канале, посвященном методологии онлайн преподавания, показывает, что профессиональное сообщество в сфере образования интересуют новые подходы к дистанционному образованию и к эффективному использованию цифровых технологий для улучшения образовательного процесса. Спрос на новую методологию преподавания логичен: удаленная форма работы со студентами ставит перед преподавателем новые вызовы. В условиях дистанционной работы нагрузка преподавателя меняется. С одной стороны, несмотря на внезапное изменение формы обучения, преподаватель должен полностью покрыть учебный план дисциплины. С другой стороны, преподавателю необходимо найти новые способы вовлечения студентов в процесс обучения, поскольку традиционные подходы к взаимодействию с учащимися (визуальный контакт, язык тела, прямой диалог, атмосфера аудитории, возможность визуального контроля учебного процесса) стали недоступны. Однако мы не считаем, что в новых условиях преподаватель остается без инструментов воздействия на студентов. На наш взгляд, современные индивидуальные электронные устройства, цифровые образовательные платформы и программное обеспечение повышают эффективность совместной работы преподавателя и студентов, чему способствует применение современных электронных приложений и собственных ресурсов вуза. Этот вопрос мы рассматривали ранее в своей статье по технологии электронного обучения в математической подготовке студентов [13].

Обзору новых возможностей, которые открываются при дистанционном обучении с применением цифровых технологий, посвящена наша статья.

В данной работе мы анализируем наш собственный опыт преподавания на платформе для проведения онлайн-занятий Zoom (<https://zoom.us>) и в системе

управления курсами Moodle (<https://moodle.org>). Мы остановимся на шести аспектах онлайн обучения как потенциальных точках роста:

1. Социальное давление на студента и функция Zoom «индивидуальный чат».
2. Вовлеченность студента в образовательный процесс и три функции Zoom: кнопки обратной связи участников, вид галерея и панель интерактивного комментирования (во время демонстрации экрана).
3. Масштабирование занятия и функция Zoom «запись видео».
4. Индивидуальный подход к обучению и две функции Zoom: доска сообщений с использованием графического планшета и работа в сессионных залах.
5. Контроль усвоения материала и функционал платформы Moodle.
6. Мотивация преподавателя.

Социальное давление на студента

Важным преимуществом дистанционного обучения является отсутствие социального давления на студента со стороны сокурсников. При очной форме обучения социальное давление является важным фактором снижения вовлеченности учащихся в образовательный процесс: под воздействием коллектива некоторые студенты могут испытывать трудности в открытой коммуникации с преподавателем (например, задавать вопросы, если материал непонятен) из-за боязни насмешек, саркастических комментариев и негативной оценки окружающих. Вследствие социального давления студент может испытывать психологическую зажатость и меньше вовлекаться в образовательный процесс. Данную проблему можно в значительной мере избежать при удаленном формате обучения. Наш опыт в течение весенне-летнего семестра 2020 года показал, что активность студентов на занятиях существенно повысилась при переходе на дистанционную форму преподавания: функционал программного обеспечения, которое используется при онлайн занятиях, позволяет минимизировать возможность социального давления группы.

На платформе Zoom есть функция «индивидуальный чат», которая позволяет написать сообщение только преподавателю. Поскольку другие участники занятия не видят данное сообщение, то коллектив не может воздействовать на студента. При таком формате обучения у заинтересованных студентов растут стимулы к активному участию на занятиях по ряду причин. Во-первых, отвечая на вопрос студента перед всей аудиторией, преподаватель тем самым дает понять студенту важность его вопроса. Во-вторых, функция «индивидуальный чат» дает студенту ощущение персонального контакта с преподавателем. Таким образом, довольно простая возможность в процессе занятия задать вопрос преподавателю индивидуально, а не ждать окончания семинара или лекции, и при своевременной и корректной реакции преподавателя на сообщение в чате, позволяет студенту быть вовлеченным в процесс даже больше, чем когда он присутствовал на занятии в аудитории.

Вовлеченность студента в образовательный процесс

При проведении онлайн занятий у преподавателя (как и у студентов) может возникнуть ощущение изоляции и абстрагирования (сидишь и разговариваешь в экран). Чтобы это не случилось, важно использовать разные элементы интегрирования студентов и себя самого в интерактивное занятие. Цифровые технологии в целом дают возможность повышать вовлеченность студента в образовательный процесс, и мы хотим привести три конкретных примера из нашей практики весенне-летнего семестра 2020 г. на платформе Zoom, которая имеет несколько полезных инструментов, которые могут помочь: галерея участников, кнопки обратной связи, панель интерактивного комментирования.

В начале каждого онлайн класса пригласите всех студентов включить видео и все вместе поздоровайтесь. С помощью функции Zoom «вид – галерея» вы можете видеть всех участников одновременно (максимально на одной странице – 49 участников, при

большем количестве необходимо прокручивать страницу вправо/влево). Потратив всего несколько минут на то, чтобы увидеть друг друга, вы сразу задаете более энергичное настроение в группе. Вы как преподаватель демонстрируете, что не просто отчитываете материал, но и заинтересованы увидеть и поприветствовать своих студентов.

Читая лекцию, с периодичностью в несколько минут инициируете невербальную обратную связь со студентами, используя кнопки обратной связи. В списке участников на платформе Zoom доступны кнопки обратной связи: да, нет, и др. Задавайте вопросы студентам и просите их ответить да или нет, например, сигнализируя «да, понятно/согласен, может продолжать» или «нет, не понятно/не согласен», используя эту функцию. На панели преподавателя вы моментально видите статистику этих ответов и можете оценить обстановку в группе. Важно отметить, что это также позволяет отслеживать, слушают ли вас студенты: если нет реакции, то рабочий контакт со студентом отсутствует.

Во время занятий часто необходимо не только устное выступление студентов, что технически легко выполнимо в Zoom, но и письменное, например, работа на доске одного или нескольких студентов. В панели интерактивного комментирования Zoom (во время демонстрации экрана) доступны следующие инструменты: рисование, текст, ластик, отслеживание (курсор превращается в инструмент отслеживания или стрелку), формат (изменение настроек комментариев) и др. Использование данной функции позволяет сразу нескольким студентам участвовать в занятии в режиме реального времени.

Перечисленные выше инструменты превращают студента в активного участника образовательного процесса: они создают возможность для учащихся не просто пассивно воспринимать материал, а предоставлять преподавателю постоянную обратную связь как об организации самого учебного процесса (например, если преподаватель слишком быстро излагает материал), так и эффективно задавать вопросы. Таким образом, происходит «закольцовывание»: преподаватель читает лекцию или объясняет студентам материал на занятии, студенты в свою очередь задают вопросы в отсутствие социального давления, а также посылают невербальные сигналы (имитируя визуальный контакт), преподаватель, видя вовлеченность аудитории, получает дополнительную мотивацию, повышая тем самым заинтересованность студентов в изучаемом предмете [14].

Масштабирование занятий

Немаловажным аспектом дистанционного обучения является масштабирование занятий. Очная форма обучения ограничена размером аудитории и необходимостью повторять один и тот же материал нескольким академическим группам. При таком подходе, к сожалению, ценный временной ресурс преподавателя расходуется не самым оптимальным образом: повторение материала оставляет мало времени для подготовки продуманных, структурированных лекций и семинарских занятий (дистанционная форма обучения при этом требует от преподавателя творческой переработки материала), дополнительных занятий со студентами, консультаций, подготовки контрольных работ, защит индивидуальных домашних заданий и т.п.

Дистанционная форма проведения семинарских занятий позволяет использовать часы практических занятий более рационально. Если в аудитории на практическом занятии присутствовать может только одна группа, то практическое занятие в системе Zoom позволяет объединять группы. Таким образом, происходит масштабирование: вместо трех семинарских занятий преподаватель проводит одно, а высвободившееся время использовать для индивидуальной работы со студентами, повышения профессиональной квалификации, методической подготовки к занятиям и.

Масштабирование занятий имеет еще один важный аспект, который мы хотели бы обсудить: возможность повторного доступа к семинарским занятиям. Использование

функции Zoom «запись видео» позволяет частично или полностью записать практическое занятие, которое студент может пересмотреть в любой момент при самостоятельной подготовке к последующим занятиям или экзамену.

Данная функция, на наш взгляд, является особенно актуальной в период повышенного риска заболевания сезонными вирусными инфекциями: студенты при пропуске занятий получают полный доступ к материалам семинарских занятий и возможность получить индивидуальную консультацию у преподавателя, у которого высвобождается временной ресурс за счет масштабирования семинарских занятий.

Более того, функция Zoom «запись видео» позволяет более инновативно организовывать подачу учебного материала: при желании все видео материалы занятия (или всего курса) можно разбить на небольшие видеоролики и предоставлять к ним доступ по запланированному расписанию (до или после онлайн занятий) для самостоятельного или дополнительного изучения.

Техническая реализация подобной структуры подачи материала и преподавания стала возможной благодаря системе управления курсами Moodle: она позволяет загружать видеоматериалы, разбивать курс на части, устанавливать порядок просмотра видеоматериалов. Преподаватели получают, таким образом, возможность централизованно распределять материалы студентам для изучения. Использование функционала платформ Zoom и Moodle позволяет студентам самостоятельно подобрать подходящий и наиболее комфортный темп обучения и детально и качественно осваивать материал небольшими частями.

Контроль усвоения материала

Помимо структурной подачи изучаемых материалов, мы хотели бы обсудить еще один аспект системы управления курсами Moodle: возможность эффективного контроля усвоения материала. Данный портал позволяет преподавателям устанавливать сроки доступа к определенным материалам, а также сроки для сдачи домашних работ, которые можно, в том числе загрузить в Moodle, выставлять оценки и т.п. Данный ресурс незаменим для эффективной организации образовательного процесса: использование одной платформы позволяет преподавателю с минимальными временными затратами предоставлять доступ к материалам курсов и контролировать усвоение материала.

Индивидуальный подход к обучению

Онлайн форма обучения создает новые возможности для индивидуализации процесса обучения. Технически эта концепция реализуется при использовании функции Zoom «доска сообщений» и графического планшета. Комбинация этих инструментов позволяет в режиме реального времени выполнять объяснение сложного материала и решение задач любого уровня сложности – это то же самое, когда преподаватель объясняет материал и пишет на доске в аудитории. Студенты видят на видео весь процесс объяснения/решения задачи и параллельно слушают комментарии преподавателя. Немаловажным является тот факт, что при таком подходе, в отличие от обучения в аудитории, у студента формируется ощущение, что преподаватель объясняет материал именно для него: записи преподавателя отображаются на экране компьютера или смартфона студента.

Кроме того, более индивидуализированный подход к обучению, по сравнению с семинарским занятием для целой академической группы, становится возможным благодаря функции Zoom «сессионные залы». Это функция предоставляет возможность разделить аудиторию на 50 (или меньше) отдельных параллельно работающих малых групп. При умелом использовании данного инструмента, преподаватель может эффективно организовать работу студентов в малых группах, повышая тем самым их вовлеченность при освоении нового материала, и предоставлять более прицельную индивидуальную обратную связь студентам.

Мотивация преподавателя

В последнем пункте мы хотели бы обсудить трансформацию, которую неизбежно проходят преподаватели при переходе с очной формы обучения на дистанционную. Среди многих преподавателей существует страх, что если весь материал будет доступен для самостоятельного изучения, например, на платформе Moodle (лекционные слайды, видео-записи семинарских занятий), то ценность преподавателя снижается. Однако мы не разделяем данную точку зрения. При дистанционном обучении роль преподавателя чрезвычайно важна: он не только предоставляет доступ к изучаемым материалам и дает обратную связь, но и выступает «проводником» студента в изучаемую дисциплину. Именно преподаватель может помочь студенту эффективно сориентироваться в многообразии доступных учебных материалов в интернете: сформулировать структуру изучаемого предмета, помочь сфокусироваться «на главном», подобрать качественные научные источники. С этой точки зрения, преподаватель действительно перестает быть единственным источником знаний для студента, однако именно экспертность преподавателя в дисциплине – это ресурс, ценность которого особенно возрастает при дистанционном обучении. В условиях конкуренции множества источников информации за внимание людей именно преподаватель может помочь студентам концентрировать ограниченные психологические и когнитивные ресурсы для изучения только важных, релевантных их будущей профессии материалов. Кроме того, наличие у преподавателя качественного материала для самостоятельной работы студентов только повышает его экспертность. Грамотно составленный академический курс для дистанционного обучения может пользоваться спросом у студентов других высших учебных заведений, повышая, тем самым, рейтинг самого преподавателя и его ВУЗа.

Дистанционное обучение, безусловно, ставит новые вызовы перед преподавателем, однако в настоящее время существует множество цифровых и технологических инструментов, которые позволяют преподавателю повышать свою квалификацию. Организация процесса онлайн обучения студентов математике в соответствии с представленными аспектами его организации как потенциальными точками роста и позволил нам выделить те особенности, которые повышают качество обучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Локтионов, С. Новые возможности для обучения и развития / С. Локтионов // Международный опыт противодействия кризису. – РЭС. – № 7. – 2020. – С. 27-30
2. Годовой доклад МАГАТЭ за 2019 год // Международное агентство по атомной энергии. – URL : www.iaea.org.
3. МАГАТЭ предлагает целый ряд курсов дистанционного онлайн-обучения. – URL : <https://www.iaea.org/ru/uslugi/distancionnoe-onlaynovoe-obuchenie>.
4. Хвалько, А. Опыт реагирования приходит на помощь / А. Хвалько // Электроэнергетика. Новая реальность. – РЭС. – № 6. – 2020. – С. 20-23.
5. Экспертиза расчетного кода проекта «Прорыв» впервые проведена полностью в цифровом виде с использованием портала Ростехнадзора. – URL : <https://rosatom.ru/journalist/news/ekspertiza-raschetnogo-koda-proekta-proryv-vpervye-provedena-polnostyu-v-tsifrovom-vide-s-ispolzovaniem-portala-Rostekhnadzora>.
6. Структура потребностей организаций Госкорпорации «Росатом» в наборе выпускников по специальностям (усредненные значения по 2018-2027 гг.) // Сотрудничество с вузами. – URL : <https://rosatom.ru/career/obrazovanie/sotrudnichestvo-s-vuzami/>.
7. Новые форматы смешанного обучения // EduTech. – № 21. – 2020. – URL : www.sberbank-university.ru.
8. Каким будет инженерное образование будущего. Образовательные технологии будущего: что ждет инженерные и вычислительные науки в ближайшие 10 лет? Неспособность к изменениям: почему только с помощью технологий нельзя изменить образование? Дидактика

- будущего: как цифра изменит преподавание / Онлайн-дискуссии // Международный научно-методический центр НИЯУ МИФИ. – URL : <https://ismc.mephi.ru>.
9. Эффективный переход в дистанционное обучение // EduTech. Спецвыпуск. – 2020. – URL : www.sberbank-university.ru.
 10. Современная цифровая образовательная среда в РФ. – URL : <https://online.edu.ru/public/promo>.
 11. Обучение в новой нормальности: вызовы и ответы. Аналитический отчёт. – Москва : АНО ДПО «Корпоративный университет Сбербанка», 2020. – С. 71.
 12. Живое обучение // Telegram Analytics. – URL : <https://tgstat.ru/channel/@prolearning>.
 13. Василенко, Н. П. Технология электронного обучения в математической подготовке студентов, ориентированных на работу в атомной отрасли / Н. П. Василенко, Н. И. Чабанова // Глобальная ядерная безопасность. – 2020. – № 1(34). – С. 125-135.
 14. Вовлеченность в обучение: разумные подходы к мотивации // EduTech. – № 21. – 2020. – URL : www.sberbank-university.ru.

REFERENCES

- [1] Loktionov S. Novyye vozmozhnosti dlya obucheniya i razvitiya [New Opportunities for Learning and Development]. Mezhdunarodnyy opyt protivodeystviya krizisu [International Experience in Countering the Crisis]. RES. №7. 2020. P.27-30 (in Russian).
- [2] Godovoy doklad MAGATE za 2019 god [IAEA Annual Report 2019]. Mezhdunarodnoye agentstvo po atomnoy energii [International Atomic Energy Agency]. URL: www.iaea.org (in Russian).
- [3] MAGATE predlagayet tselyu ryad kursov distantsionnogo onlaynovogo obucheniya [The IAEA Offers a Variety of Online Distance Learning Courses]. URL: <https://www.iaea.org/ru/uslugi/distantsionnoe-onlaynovoe-obuchenie> (in Russian).
- [4] Khvalko A. Opyt reagirovaniya prikhodit na pomoshch' [Response Experience Comes to the Rescue]. Elektroenergetika. Novaya real'nost' [Electric Power Engineering. New Reality]. RES. №6. 2020. P. 20-23 (in Russian).
- [5] Ekspertiza raschetnogo koda proyekta «Proryv» v pervyye provedena polnost'yu v tsifrovom vide s ispol'zovaniyem portala Rostekhnadzora [Examination of the Settlement Code of the Breakthrough Project Was Carried out for the First Time Fully in Digital Form Using the Rostekhnadzor Portal]. URL: <https://rosatom.ru/journalist/news/ekspertiza-raschetnogo-koda-proekta-proryv-vpervyye-provedena-polnostyu-v-tsifrovom-vide-s-ispolzovan/> (in Russian).
- [6] Struktura potrebnykh organizatsiy Goskorporatsii «Rosatom» v nabore vypusknikov po spetsial'nostyam (usrednennyye znacheniya po 2018-2027 gg.) [Structure of Needs of ROSATOM Organizations in the Recruitment of Graduates in Specialties (Averaged Values for 2018-2027)]. Sotrudnichestvo s vuzami [Cooperation with Universities]. URL: <https://rosatom.ru/career/obrazovanie/sotrudnichestvo-s-vuzami/> (in Russian).
- [7] Novyye formaty smeshannogo obucheniya [New Formats of Blended Learning]. EduTech. №21. 2020. URL: www.sberbank-university.ru (in Russian).
- [8] Kakim budet inzhenernoye obrazovaniye budushchego. Obrazovatel'nyye tekhnologii budushchego: chto zhdet inzhenernyye i vychislitel'nyye nauki v blizhayshiy 10 let? Nesposobnost' k izmeneniyam: pochemu tol'ko s pomoshch'yu tekhnologiy nel'zya izmenit' obrazovaniye? Didaktika budushchego: kak tsifra izmenit' prepodavaniye [What Will Be the Engineering Education of the Future. Educational Technologies of the Future: What Will Happen to Engineering and Computational Sciences in the Next 10 Years? Failure to Change: Why Can't Technology Change Education alone? Didactics of the Future: How Digital Will Change Teaching]. Onlayn-diskussii [Online Discussions]. Mezhdunarodnyy nauchno-metodicheskiy tsentr NIYAU MIFI [NRNU MEPhI International Scientific and Methodological Center]. URL: <https://ismc.mephi.ru> (in Russian).
- [9] Effektivnyy perekhod v distantsionnoye obucheniye [Effective Transition to Distance Learning]. EduTech. Spetsvypusk [EduTech. Special issue]. 2020. URL: www.sberbank-university.ru (in Russian).
- [10] Sovremennaya tsifrovaya obrazovatel'naya sreda v RF [Modern Digital Educational Environment in the Russian Federation]. URL: <https://online.edu.ru/public/promo> (in Russian).
- [11] Obucheniye v novoy normal'nosti: vyzovy i otvety. Analiticheskiy otchet [Learning in the new normality: Challenges and Responses. Analytical Report]. Moskva: ANO DPO «Korporativnyy universitet Sberbanka» [Moscow: ANO DPO Sberbank Corporate University]. 2020. P.71 (in Russian).
- [12] Zhivoye obucheniye [Live Learning]. Telegram Analytics. URL: <https://tgstat.ru/channel/@prolearning> (in Russian).

- [13] Vasilenko N.P., Chabanova N.I. Tekhnologiya elektronnoy obucheniya v matematicheskoy podgotovke studentov, oriyentirovannykh na rabotu v atomnoy otrasli [E-Learning Technology in the Mathematical Training of Students Oriented to Work in the Nuclear Industry]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global nuclear safety]. 2020. №1(34). P.125-135 (in Russian).
- [14] Vovlechennost' v obucheniye: razumnyye podkhody k motivatsii [Learning Engagement: Smart Approaches to Motivation]. EduTech. №21. 2020. URL: www.sberbank-university.ru (in Russian).

Features of High-Quality Mathematical Training in the Context of Online Education of Students Oriented to Work in the Nuclear Industry

N.P. Vasilenko¹, N.I. Chabanova²

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

¹*ORCID iD: 0000-0001-7054-1302*

WoS Researcher ID: G-4963-2017

e-mail: NPVasilenko@mephi.ru

²*ORCID: 0000-0002-5738-6069*

e-mail: nich@inbox.ru

Abstract – Due to the COVID-19 coronavirus infection pandemic, the world is faced with the need for social isolation and a forced rapid transition to a “home office” and online learning. The Russian education system has almost completely switched to distance learning. Working in the new conditions turned the daily routine of both teachers and students who not only faced difficulties of various nature but also discovered new opportunities for professional growth. Traditionally, it is customary to discuss the disadvantages of distance education, but this paper considers the advantages and new opportunities of this form of education. This is especially important in the process of mathematical training of university students focused on work in the nuclear industry due to the specifics and importance of studying this subject and due to the fact that at present online training is widely implemented in the training of employees of nuclear power plants where digitalization and everything which is associated with remote access technologies, thanks to the pandemic, are in demand and irreplaceable.

Keywords: online education, training of specialists for the nuclear industry, Zoom program, mathematical training of students.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ НОМЕРА

Адаменков А.К.	91
Альхмуд А.З.	97
Арсеньев Д.М.	53
Ашраф О.	68
Бубликова И.А.	30
Бураева Е.А.	17
Василенко И.С.	103
Василенко Н.П.	113
Веселова И.Н.	91
Гашнева М.А.	60
Горская О.И.	30
Губеладзе А.Р.	7
Губеладзе О.А.	7
Евдошкина Ю.А.	103
Ишигов И.О.	82
Ковалев А.Ф.	60
Косогова Ю.П.	60
Кравченко П.Д.	60
Кривин В.В.	82
Круглов В.Б.	97
Мальшевский В.С.	17
Пимшин И.Ю.	53
Пимшина Т.М.	53
Ратушный В.И.	17
Руденко В.А.	103
Сапельников В.М.	30
Танаш Х.А.	97
Тихомиров Г. В.	68
Толстов В.А.	82
Ульянов В.Ю.	39
Чабанова Н.И.	113
Шпицер В.Я.	82

AUTHOR INDEX OF VOL. 4, 2020

<i>Adamenkov A.K.</i>	91
<i>Alhmoud A.Z.</i>	97
<i>Arseniev D.M.</i>	53
<i>Ashraf O.</i>	68
<i>Bublikova I.A.</i>	30
<i>Buraeva E.A.</i>	17
<i>Chabanova N.I.</i>	113
<i>Evdoshkina Yu.A.</i>	103
<i>Gashneva M.A.</i>	60
<i>Gorskaya O.I.</i>	30
<i>Gubeladze A.R.</i>	7
<i>Gubeladze O.A.</i>	7
<i>Ishigov I.O.</i>	82
<i>Kosogova Y.P.</i>	60
<i>Kovalev A.F.</i>	60
<i>Kravchenko P.D.</i>	60
<i>Krivin V.V.</i>	82
<i>Kruglov V.B.</i>	97
<i>Malyshevsky V.S.</i>	17
<i>Pimshin I.Yu.</i>	53
<i>Pimshina T.M.</i>	53
<i>Ratushny V.I.</i>	17
<i>Rudenko V.A.</i>	103
<i>Sapelnikov V.M.</i>	30
<i>Shpicer V.Ya.</i>	82
<i>Tanash H.A.</i>	97
<i>Tikhomirov G.V.</i>	68
<i>Tolstov V.A.</i>	82
<i>Ulyanov V.Yu.</i>	39
<i>Vasilenko I.S.</i>	103
<i>Vasilenko N.P.</i>	113
<i>Veselova I.N.</i>	91

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) 7.0.100-2018 «Bibliographic Record and Bibliographic Description. General Requirements and Drafting rules». 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.

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 konstruktsy. [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]. Oficialnij 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 должны иметь нумерацию и заголовки на русском и английском языках (10 пт). Желательно, чтобы таблицы не превышали одной страницы текста. 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 7.0.100-2018 (дата введения – 01.07.2019) «Библиографическая запись и библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Список литературы включает в 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, академические 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.

ПРИМЕРЫ ОФОРМЛЕНИЯ ЛИТЕРАТУРЫ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

Для книг с одним автором:

Кесслер, Г. Ядерная энергетика / Г. Кесслер ; перевод с английского Ю. И. Митяев. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 264 с.

Для книг с двумя и более авторами:

Емельянов, И. Я. Управление и безопасность ядерных энергетических реакторов / И. Я. Емельянов, П. А. Гаврилов, Б. Н. Селивестров. – Москва : Атомиздат, 1975. – 280 с.

Для журналов с одним автором:

Пантелей, Д. С. Атомная энергетика как неотъемлемый компонент энергетического комплекса Российской Федерации / Д. С. Пантелей // Науковедение. – 2017. – Т. 9, № 6. – С. 39.

Для журналов с двумя и более авторами:

Обогащение регенерированного урана в двойном каскаде газовых центрифуг с его максимальным возвратом в производство топлива / А. Ю. Смирнов, В. Е. Гусев, Г. А. Сулаберидзе, В. А. Невиница, П. А. Фомиченко // Вестник национального ядерного университета «МИФИ». – 2018. – Том 7, № 6. – С. 449-457.

Для диссертаций:

Беликов, С. О. Разработка методов интенсификации акустических резонансов и снижения уровня вибраций в главном паропроводе АЭС с ВВЭР-1000 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / С. О. Беликов. – Москва, 2013. – 30 с.

Для депонированных работ:

Кондраш, А. Н. Пропаганда книг / А. Н. Кондраш. – Москва, 1984. – 21 с. – Депонировано в НИЦ «Информпечать» 25.07.84. ФН 176.

Описание архивных материалов:

Харитон, Ю. Б. Письмо Б.Л. Ванникову о лаборатории для разработки атомных бомб // ЧУ «Центрагомархив». Фонд № 1, опись № 1/с, дело № 228, л. 76-79. – URL : http://elib.biblioatom.ru/text/carhiv_001-1s-228_076/go,0/ (дата обращения : 26.03.2019).

Список ученых, участвующих в работе по использованию атомной энергии. 17 января 1946 // Атомная программа СССР : архивные документы. – ж URL : http://elib.biblioatom.ru/text/arhiv_akademik-artsimovich_2009_386/go,0/ (дата обращения : 03.09.2019).

Материалы конференций:

Сулаберидзе, Г. А. О некоторых разделительных проблемах при вовлечении регенерированного урана в топливный цикл / Г. А. Сулаберидзе, В. Д. Борисевич, Се Цюаньсинь // Сборник докладов IX Всероссийской (Международной) научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул», Россия, Звенигород, 4-8 октября. – Троицк : ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2004. – С. 78.

Шишков, Ю. Россия и мировой рынок: структурный аспект / Ю. Шишков // Социальные приоритеты и механизмы преобразований в России : материалы международной конференции, Москва, 12-13 мая 1998 г. – Москва : Мagma, 1993. – С. 19-25.

Для патентов:

Патент 2187888 Российская Федерация, МПК7 Н 04 В 1/38, Н 04 J 13/00. Приемопередающее устройство : заявитель и патентообладатель Воронежский научно-исследовательский институт связи. – № 2000131736/09 ; заявл. 18.12.00 ; опубл. 20.08.02, Чугаева В. И. – 3 с.

Для электронных ресурсов:

Дирина, А. И. Право военнослужащих РФ на свободу ассоциаций / А. И. Дирина // Военное право : сетевой журнал – 2010. – № 2. – URL : <http://voennoegravo.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

2020, 4(37)

Главный редактор – **М.Н. Стриханов, доктор физико-математических наук, профессор**

Сдано в набор 08.12.2020 г.

Компьютерная верстка Казак Ю.Ю.

Подписано к печати 16.12.2020 г.

Бумага «SvetoCory» 80 г/м². Объем 8,55. печ.л.

Гарнитура «TimesNewRoman»,

Тираж 300 экз.

Отпечатано в типографии ВИТИ (ф) НИЯУ МИФИ