

NATIONAL RESEARCH NUCLEAR UNIVERSITY MEPhI

GLOBAL NUCLEAR SAFETY

2019, 3(32)

Founded in November, 2011

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

Quarterly

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

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

Editor-in-Chief:

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

Editorial Staff:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2019, 3(32)

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. Гоок, к-т техн. наук (Германия)

П.Д. Кравченко, д-р техн. наук, проф. (Россия)

А.П. Елохин, д-р техн. наук, проф. (Россия)

А.В. Чернов, д-р техн. наук, проф. (Россия)

Ю.И. Пимшин, д-р техн. наук, проф. (Россия)

Ю.П. Муха, д-р техн. наук, проф. (Россия)

В.В. Кривин, д-р техн. наук, проф. (Россия)

В.И. Ратушный, д-р физ.-мат. наук, проф. (Россия)

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

2019, 3(32)

THE PROBLEMS OF NUCLEAR, RADIATION AND ECOLOGICAL SAFETY

- The Method of Assessment of Radioactive Nitrogen $^{16}\text{N}_7$ Leaks in Steam Generators Used at Nuclear Reactors of KLT-40 Type
A.P. Elokhin, S.N. Fedorchenko 7
- The Radiation Factors Dynamics Analysis of the Rostov NPP Location Area
I.A. Bublikova, O.F. Tsuverkalova 24
- Assessment of the Influence Consequence of Kinetic Impactors at Explosive Object with Small-Scale Nuclear Power Facility
O.A. Gubeladze, A.R. Gubeladze 33

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

- Problems of Protective Shell in Radial Crane Tests and its Use in Basic Heavy Structure Installation at the NPP Project
Yu.I. Pimshin, A.S. Demidenko, I.Yu. Pimshin 41
- Automated Station for Maintenance and Restoration of Battery Capacity
S.A. Baran, G.P. Smetankin 50

NUCLEAR FACILITIES EXPLOITATION

- Decrease the Volume of Boric Regulation of the Reactivity when Using the Burnable Absorber on the Basis of (GD2O3) in the Fuel Reactor WWER-1200
M.A. Abu Sondos, V.M. Demin, V.I. Savander 56
- Production Logistics of Dismantling Works in the NPP Unit Decommissioning
A.I. Berela, S.A. Tomilin, A.G. Fedotov 66
- Comparative Analysis of Generating Path in Horizontal NPP Steam Generators
Michael Nii Sanka Ansah (Ghana), N.N. Podrezov 74
- Development of Methods for Calculating the Frequency of Acoustic Standing Waves Generated by WWER Reactors
K.N. Proskuryakov, S.K. Belova, A.V. Anikeev, E. Afshar 80
- Ways to Improve the Coefficient Reproduction of Quick Reactors with Oxide Fuel and Sodium Coolant
A.K. Harutyunyan, S.B. Vygovskiy, A.G. Khachatryan 89

Automation of the Collection and Processing of Equipment Diagnostic Parameters of New NPP Units <i>Z.O. Kavrishvili, V.L. Rachkov</i>	101
--	-----

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

Customized Training Courses for Masters as a Factor of Nuclear Industry Personnel Competitiveness <i>M.V. Golovko, I.V. Sudilovskaya, A.V. Antsibor</i>	111
--	-----

Place of Higher Education Organizations in the State and Business Economic Security Strategy <i>S.P. Agapova, N.A. Efimenko, N.I. Lobkovskaya, J.S. Rogacheva, I.A. Ukhulina</i>	119
---	-----

Leadership in safety culture and issues of its formation in the university focused on training specialists for the nuclear industry <i>I.S. Vasilenko, Yu.A. Evdoshkina, V.A. Rudenko</i>	127
--	-----

Author Index of vol. 3, 2019	138
------------------------------------	-----

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 3(32), 2019

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

- Метод оценки протечки радиоактивного азота $^{16}\text{N}_7$ в парогенераторах, используемых на ядерных реакторах типа КЛТ-40
А.П. Елохин, С.Н. Федорченко..... 7
- Анализ динамики радиационных факторов региона расположения Ростовской АЭС
И.А. Бубликова, О.Ф. Цуверкалова..... 24
- Оценка последствий воздействия кинетических ударников на взрывоопасный объект с малогабаритной ядерной энергетической установкой
О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе..... 33

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

- Проблемы защитной оболочки при испытаниях крана радиального действия и его использовании при монтаже основных тяжеловесных конструкций на строящейся АЭС
Ю.И. Пимшин, А.С. Демиденко, И.Ю. Пимшин..... 41
- Автоматизированная станция для обслуживания и восстановления емкости аккумуляторных батарей
С.А. Баран, Г.П. Сметанкин..... 50

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

- Снижение объема борного регулирования запаса реактивности при использовании выгорающего поглотителя на основе (GD2O3) в топливе реактора ВВЭР-1200
М.А. Абу Сондос, В.М. Демин, В.И. Савандер..... 56
- Производственная логистика демонтажных работ при выводе из эксплуатации блоков атомных станций
А.И. Берела, С.А. Томилин, А.Г. Федотов..... 66
- Сравнительный анализ парогенерирующего тракта в горизонтальных парогенераторах АЭС
М.Н.С. Ансах, Н.Н. Подрезов..... 74
- Разработка методики расчёта частот акустических стоячих волн, генерируемых реакторами ВВЭР
К.Н. Проскуряков, С.К. Белова, А.В. Аникеев, И. Афшар..... 80

Пути повышения коэффициента воспроизводства быстрых реакторов с оксидным топливом и натриевым теплоносителем
А.К. Арутюнян, С.Б. Выговский, А.Г. Хачатрян..... 89

Автоматизация сбора и обработки диагностических параметров оборудования новых энергоблоков АЭС
З.О. Кавришвили, В.Л. Рачков..... 101

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

Кастомизированные учебные курсы для магистров как фактор конкурентоспособности кадров для атомной отрасли
М.В. Головки, И.В. Судилова, А.В. Анцибор..... 111

Место образовательных организаций высшего образования в стратегии обеспечения экономической безопасности государства и бизнеса
*С.П. Агапова, Н.А. Ефименко, Н.И. Лобковская, Ж.С. Рогачева,
И.А. Ухалина* 119

Лидерство в культуре безопасности и вопросы его формирования в вузе, ориентированном на подготовку специалистов для атомной отрасли
И.С. Василенко, Ю.А. Евдошкина, В.А. Руденко 127

Авторский указатель номера 3(32), 2019 137

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 621.039.58

**МЕТОД ОЦЕНКИ ПРОТЕЧКИ РАДИОАКТИВНОГО АЗОТА $^{16}\text{N}_7$
В ПАРОГЕНЕРАТОРАХ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ НА ЯДЕРНЫХ
РЕАКТОРАХ ТИПА КЛТ-40**

© 2019 А.П. Елохин*, С.Н. Федорченко**

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

**Акционерное общество «Специализированный научно-исследовательский институт приборостроения», Москва, Россия

В работе рассматривается протечка радионуклида азота $^{16}\text{N}_7$ ($T_{1/2} = 7,11$ с, $E_{\gamma, \max} = 6,134$ МэВ, $\nu_{\gamma, \max} = 69\%$), возникающего в 1-ом контуре реактора КЛТ-40, используемого на ледоколах и плавучих энергоблоках (ПЭБ-ах), через парогенератор во второй контур, в который поступает вода под давлением P_v , с температурой T_v , нагревается с образованием радиоактивного пара, выход которого осуществляется через спиральный паропровод парогенератора под высоким давлением P_p . содержание указанного радионуклида в паре можно обнаружить и оценить путём применения методов спектрометрии γ -излучения, измерения объёмной γ -активности пара, измерения мощности дозы γ -излучения пара и применением расчётной модели, использующей несложный математический аппарат, позволяющий определить область протечки. В работе указываются основные области в конструкции парогенератора, на которых могут быть осуществлены измерения радиационных характеристик и методы их оценки.

Ключевые слова: энергетический реактор, радионуклид, парогенератор, давление температура, мощность дозы, радиационная безопасность.

Поступила в редакцию 14.05.2019

После доработки 08.08.2019

Принята к публикации 13.08.2019

При эксплуатации реакторов серии КЛТ-40* и ряда других водо-водяных ядерных реакторов в соответствии с регламентом по радиационной безопасности ядерных корабельных установок было обнаружено, что струя пара парогенератора, поступающего на турбину, содержит радионуклид $^{16}\text{N}_7$ ($T_{1/2} = 7,11$ с, с энергией γ -излучения $E_{\gamma, \max} = 6,134$ МэВ и квантовым выходом $\nu_{\gamma, \max} = 69\%$) (рис. 1), содержание которого в паре свидетельствует о признаке нарушения герметичности водопаропровода второго контура парогенератора, что можно обнаружить путём использования метода спектрометрии γ -излучения, измерения объёмной γ -активности пара в совокупности с методом измерения мощности дозы γ -излучения пара.

*КЛТ-40 – водо-водяной ядерный реактор, разработанный в ОКБМ имени И.И. Африкантова. Изготавливался на Нижегородском машиностроительном заводе. Указанный тип реакторов широко используется на ледоколах и плавучих энергоблоках (ПЭБ).

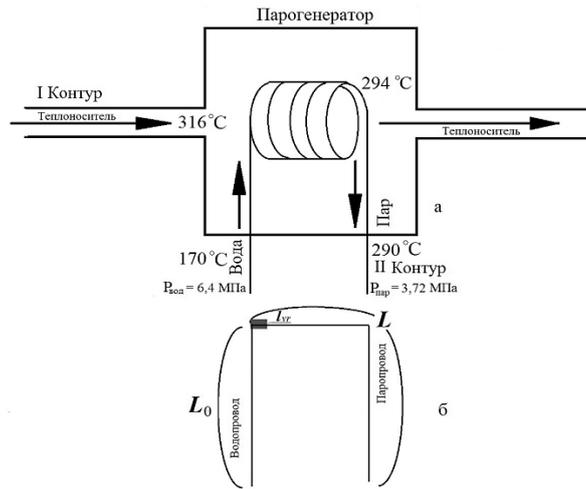
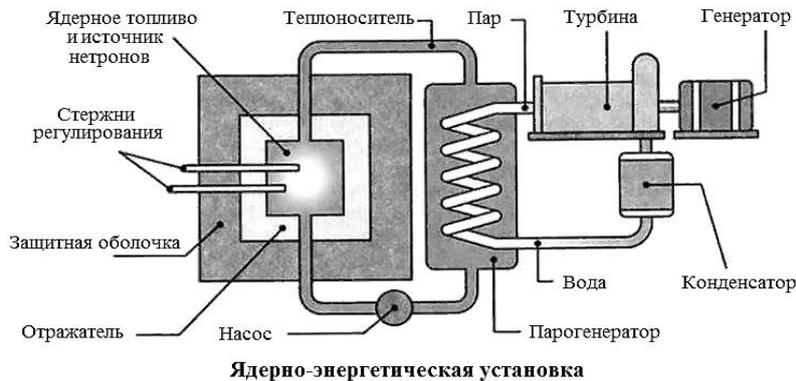


Рисунок 1 – Иллюстрация к вопросу о протечке радионуклида ^{16}N из первого контура в паропровод второго – (а). К расчёту плотности пара $\rho\text{p}(x)$ и объёмной активности $\text{QN}(x, t)$ ^{16}N в паропроводе парогенератора – (б); l_{vr} – ширина области протечки. Энергетические характеристики пара и воды приводятся из работ [1, 2] [Illustration to the issue of ^{16}N radionuclide leakage from the primary circuit to the second steam line is (a). Calculation of the steam density $\rho\text{p}(x)$ and the volume activity $\text{QN}(x, t)$ ^{16}N in the steam generator steam line is (b); l_{vr} is the width of the leak area. The energy characteristics of steam and water are given from [1, 2]

Общий принцип работы ядерного реактора на ядерной энергетической установке (ЯЭУ) и принципиальная схема парогенератора, располагающегося вертикально на ядерной установке, приводится на рисунке 2.



Ядерно-энергетическая установка

Рисунок 2 – Основные элементы ядерно-энергетической установки. Общая схема и принцип работы парогенератора [The main elements of the nuclear power plant. The general scheme and principle of the steam generator operation]

Во второй контур парогенератора по водопроводу поступает вода под давлением $P_{\text{в}}$ (левая область рис. 1а), с температурой $T_{\text{в}}$, нагревается с образованием пара, выход которого через N спиральных паропроводов того же внутреннего диаметра осуществляется с температурой $T_{\text{п}}$ под высоким давлением* $P_{\text{п}}$ [1, 2]. В процессе прохождения воды по водопроводу в парогенераторе вода нагревается до температуры насыщения пара при соответствующем давлении, испаряется на внутренней поверхности трубок парогенератора, создавая эффективную пограничную область вода-пар и, наконец, в виде перегретого пара поступает на турбину. Таким образом, на вход турбины подается пар высокого давления, перегретый относительно температуры насыщения. Зависимость температуры кипения воды (парообразования) от её давления приведена в таблице 1.

* Такой тип парогенератора характерен для реакторов КЛТ-40 и других водо-водяных ядерных реакторов [1]

Таблица 1 – Зависимость температуры кипения воды от давления P [The dependence of the boiling point of water on pressure P]

P		tk, °C	P		tk, °C
кПа.	атм.		кПа.	атм.	
0,981	0,01	6,698	196,1	2,0	119,62
1,961	0,02	17,20	245,2	2,5	126,79
3,923	0,05	28,64	294,2	3,0	132,88
9,807	0,1	45,45	392,3	4,0	142,92
19,61	0,2	59,67	490,3	5,0	151,11
29,42	0,3	68,68	588,4	6,0	158,08
39,23	0,4	75,42	686,5	7,0	164,17
49,03	0,5	80,86	784,5	8,0	169,61
58,84	0,6	85,45	882,6	9,0	174,53
68,65	0,7	89,45	980,7	10,0	179,04
78,45	0,8	92,99	1961	20,0	211,38
88,26	0,9	96,18	2452	25,0	222,90
98,07	1,0	99,09	4903	50,0	262,70
101,3	1,033	100,00	9807	100,0	309,53
147,1	1,5	110,79	-	-	-

Используя свойство воды как несжимаемой жидкости, и учитывая, что процесс регулирования паро-водного баланса в водо-паропроводе автоматизирован, путём использования обратной связи, приходим к выводу, что избыток давления пара приведет к некоторому смещению воды относительно равновесного положения в пограничной области вода-пар, в которой температура будет изменяться в соответствии с температурой соответствующей среды. Автоматическое регулирование процесса, которое осуществляется с помощью поступления воды из уравнивательной цистерны [1], приведёт к повышению давления воды в водопроводе и обратному смещению воды в первоначальное положение. Этот флуктуационный процесс около некоторого равновесного положения в указанной пограничной области пар-вода будет происходить с некоторой частотой.

Таким образом, в пограничной области на водо-паропроводе будет постоянно изменяться температурный режим. Последнее автоматически приведёт к аналогичному изменению частоты механических напряжений водо-паропровода в этой области, последующей усталости металла и к вероятному появлению микротрещин, через которые из первого контура во второй может проникать радионуклид ^{16}N , создавая, так называемую, протечку. Поскольку плотность пара существенно меньше плотности воды радиоактивный азот будет распространяться в область паровой фазы, включая и выход пара на турбину, как отмечалось выше, наличие последнего в паре с учётом радиоактивного распада, в заданной точке паропровода, может быть определено по измеренному значению мощности дозы, создаваемой указанным радионуклидом. Таким образом, для оценки рассматриваемых величин, в условиях стационарного процесса, необходимо знание плотности распределения воды $\rho_v(T)$, поступающей в водопровод парогенератора, как функции температуры при её переносе вдоль оси x по водопроводу (рис. 3), плотности пара $\rho_p(T)$ как функции температуры (рис. 4) или расстояния x при его переносе вдоль оси x по паропроводу (рис. 1б) при спрямлении его спиральной части длиной L с внутренним радиусом $R_0 = 1,5 - 2,0$ см ($0 \leq r \leq R_0$).

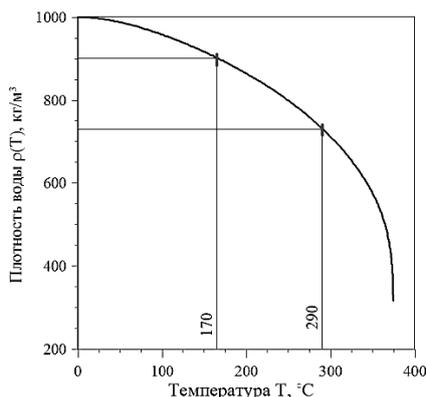


Рисунок 3 – Зависимость плотности воды $\rho(T)$ от температуры. Область кривой между метками аппроксимируется для удобства работы параболой [The dependence of $\rho(T)$ water density on temperature. The area of the curve between the marks is approximated for convenience by a parabola]

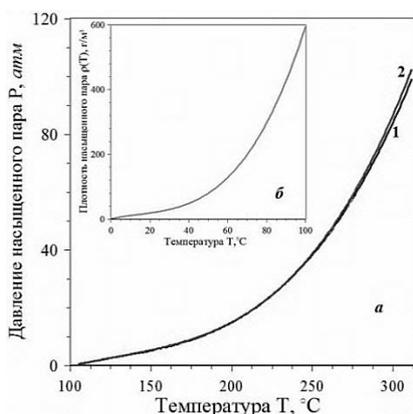


Рисунок 4 – Зависимость давления (а) и плотности (б) насыщенного пара как функции температуры. Кривая 1 (рис.4 а) приведена в единицах (атм.), кривая 2 – в единицах (кг/см²) [Dependence of pressure (а) and density (б) of saturated steam as a function of temperature. Curve 1 (Fig. 4 а) is given in units (atm.), Curve 2 is given in units (kg / cm²)]

При этом длина водопровода (вертикальная область в левой части (рис. 1б) будет составлять L_0 ($L_0 < L$).

Таким образом, характер зависимости плотности воды и пара как функций температуры существенно различаются: плотность воды с ростом температуры падает, а плотность пара растёт и, соответствующим образом изменяются давление воды или пара. Если принять, что рост температуры по водо-паропроводу пропорционален расстоянию x , то найдём, что при некотором x_L давление пара и воды может быть уравновешено. Тогда это значение $x_L = L_0$ и определит эффективную длину водопровода, в пограничной области которой будет возникать протечка.

Рассмотрим особенности физического процесса переноса воды, которая подаётся в водопровод парогенератора, при начальном давлении $P_{тр} \approx 6,1-6,4$ МПа. В результате передачи тепла от теплоносителя первого контура вода в трубопроводе парогенератора дополнительно нагревается, что приводит к уменьшению её плотности, испарению и образованию насыщенного пара, давление которого растёт с температурой, т.е. с ростом x . Таким образом, при формулировке задачи переноса воды в трубопроводе необходимо учитывать её движение с заданной скоростью, определяемое начальным давлением и плотностью, уменьшение плотности воды с ростом температуры и её испарение. Поэтому, полагая, что поперечная скорость переноса воды на стенки трубопровода равна нулю, стационарное уравнение, учитывающее эти физические процессы для частицы воды массой $m = \rho(T)V_B$, занимающей объём $V_B = \pi R_0^2 L_0$, в цилиндрической геометрии будет выглядеть следующим образом:

$$v_b \frac{d\rho_b}{dx} = \frac{G}{V_b} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r K_b \left(\rho_b, T \right) \frac{\partial \rho_b}{\partial r} \right] - u_n \frac{S_b}{V_b}, \quad (1)$$

где v_b – скорость переноса воды по водопроводу; G – генерация воды (нагнетание воды под давлением см. рис.1а, $G = \text{const.}$), [кг/с]; $K(r, T)$ – коэффициент турбулентной диффузии воды в водопроводе; $u_n(T)$ – скорость испарения воды или скорость генерации пара, [кг/м²с]; $S_b = 2\pi R_0 L_0$ – площадь испарения воды. Поскольку площади испарения S_b воды и занимаемый ею объём V_b являются характеристиками одного и того же объёма среды, то их отношение $S_b/V_b = 2/r_0$. Если спираль паропровода представить горизонтальным участком (см. рис. 1б), а изменение температуры в среде второго контура парогенератора аппроксимировать некоторой линейной функцией, зависящей от x :

$$T(x) = 170 + 120x/(L_0+L) \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2)$$

в которой x удовлетворяет неравенству $0 \leq x \leq (L_0 + L)$, то граничные условия задачи, удовлетворяющие температурному распределению воды в парогенераторе, будут выглядеть следующим образом:

$$\rho_b(\rho_b, r, T) \Big|_{x=0} = \rho_b(\rho_b) = 170 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3)$$

$$\rho_b(\rho_b, r, T) \Big|_{r=R_0} = \rho_{\text{тр}}(\rho_b, R_0, T), \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho_b}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0. \quad (5)$$

При этом температура воды в граничном условии (3) будет соответствовать температуре её входа в парогенератор (рис. 1а), а её плотность $\rho_b(T)$ определится плотностью, представленной на рисунке 3, при температуре $T = 170 \text{ } ^\circ\text{C}$. Граничное условие (4) будет характеризовать плотность воды, которая изменяется как функция расстояния x в соответствии с принятой линейной зависимостью температуры T от расстояния x , определяемой формулой (2), в водо-паропроводе в соответствии с выделенной областью на рисунке 3.

Граничное условие (5) соответствует условию экстремума в плотности распределении воды в водопроводе в силу свойства её радиальной симметрии. Оценка скорости переноса воды массой m по водопроводу может быть получена из условия равенства кинетической и потенциальной энергий давления воды на входе второго контура парогенератора $P_{\text{тр}} V_b / N = m v_b^2 / 2$, где N – число водопроводов в пакете. Уточним физический смысл этого равенства. Потенциальная энергия может быть затрачена: на совершение работы против сил трения воды о стенки трубы водопровода, на кинетическую энергию при перемещении частиц жидкости (воды) по водопроводу со скоростью v_b и изменение внутренней энергии среды (опять же воды), например, в результате изменения её температуры за счёт трения, т.е.: $P_{\text{тр}} V_b = A_{\text{тр}} + E_{\text{кин}} + U_{\text{вн}}$. Но поскольку температура теплоносителя первого контура значительно больше температуры воды на входе, второго контура (рис.1а), постольку вода в трубках второго контура испаряется в области стенок, а её основная масса находится в тонкой паровой оболочке и переносится без трения, поэтому первым слагаемым можно пренебречь. По этой же причине можно пренебречь и третьим слагаемым, учитывая, что изменение внутренней энергии воды осуществляется, в основном, за счёт передачи тепла теплоносителем первого контура второму (см. рис. 1а и рис. 2). Отсюда и

возникает указанное равенство. Поэтому, учитывая свойство воды как несжимаемой жидкости, будем считать её скорость в каждой трубке водопровода постоянной величиной, определяемой выражением:

$$v_v = \sqrt{2P_{гр} / \rho_{гр}} \quad (6)$$

В формуле (6) $\rho_v(T)$ в диапазоне температур $170 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 290 \text{ }^\circ\text{C}$ будет определяться зависимостью, приведенной на рисунке 3, а изменение температуры с расстоянием x – формулой (2). Зависимость скорости испарения или генерации пара (испарения с единицы поверхности, $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$) как функции температуры $u_n(T)$, определяющей в уравнении (1) уменьшения массы воды или её плотности, представлена на рисунке 5 [3].

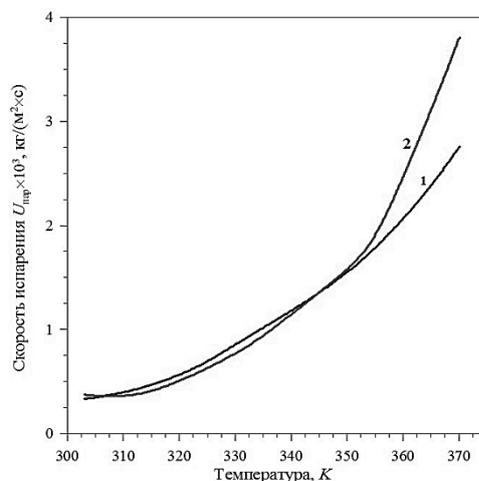


Рисунок 5 – Зависимость скорости испарения водяного пара дистиллированной воды от температуры: 1 – результат теоретической оценки, 2 – результат эксперимента [3] [Dependence of the rate of evaporation of distilled water water vapor on temperature: 1 is the result of theoretical evaluation, 2 is the result of the experiment [3]]

Кроме того, расчётные оценки скорости испарения пара $u_n(T)$ при изменении температуры от T_0 до T (К) могут быть найдены по формуле Клапейрона-Клазиуса:

$$u_n(T) = u_n(T_0) \exp \left[-\frac{\Lambda m_n}{R} \left(\frac{T_0 - T}{T T_0} \right) \right], \quad (7)$$

где Λ – удельная теплота парообразования, которая также зависит от температуры;

m_n – масса пара;

T_0 – начальная температура, например, $T_0 = 170 \text{ }^\circ\text{C}$.

Полная зависимость $\Lambda(T)$ в диапазоне температур $0 \leq T \leq 374 \text{ }^\circ\text{C}$ приводится в таблице 2. Зависимость (7) показывает, что с ростом температуры ($T > T_0$) скорость испарения воды увеличивается.

Анализ уравнения (1) показывает, что в трубках водо-паропровода указанного радиуса масштаб турбулентности ограничен и не может быть больше внутреннего радиуса трубки. Поэтому вторым слагаемым в правой части уравнения (1), характеризующим турбулентность потока воды, распространяющейся по водопроводу, в первом приближении, при оценке плотности воды можно пренебречь. Тогда, подставляя в формулу (1) выражение (6), после несложных преобразований вместо (1) получим уравнение (8), решение которого определится выражением (9):

$$\frac{d\rho_{\text{в}}}{\sqrt{\rho_{\text{в}}}} = \left(\frac{G}{V_{\text{в}}} - u_{\text{н}} \frac{2}{r_0} \right) \frac{dx}{\sqrt{2P_{\text{тр}}/N}}, \quad (8)$$

$$\rho_{\text{в}} \sqrt{2P_{\text{тр}}/N} = \left[\frac{1}{2\sqrt{2P_{\text{тр}}/N}} \left(\frac{G}{V_{\text{в}}} x - \int_0^x u_{\text{н}} \frac{2}{r_0} dx' \right) + C \right]^2, \quad (9)$$

где постоянная C определяется через граничное условие (3), т.е. значение плотности воды из рисунка 3 при $T = 170 \text{ }^\circ\text{C}$, $x = 0$ ($C = \sqrt{\rho_{\text{тр}}} \sqrt{2P_{\text{тр}}/N}$), а зависимость температуры в выражении скорости испарения воды $u_{\text{н}}(T)$ и удельной теплоты парообразования, определяемых формулой (7) и данными таблицы 2, от координаты x определяется выражением (2).

Таблица 2 – Значения удельной теплоты парообразования воды при разных температурах [Values of specific heat of water vaporization at different temperatures]

Температура $^\circ\text{C}$	Удельная теплота парообразования	Температура $^\circ\text{C}$	Удельная теплота парообразования $\Lambda(T)$, МДж/кг
0	2,45	250	1,71
50	2,38	300	1,38
100	2,26	350	0,88
150	2,12	374	0
200	1,96	-	-

Из полученного выражения (9) следует, что поскольку скорость испарения воды с ростом температуры увеличивается, то второе слагаемое в круглых скобках в (9) будет расти значительно быстрее (экспоненциально) по сравнению с первым слагаемым с ростом x . Это приведёт к тому, что при некотором x плотность протекающей по водопроводу воды с ростом температуры будет уменьшаться, что не противоречит графику, приведённому на рисунке 3. Тогда, полагая постоянной скорость переноса воды по водопроводу, поскольку её перенос происходит без трения (этому способствует процесс парообразования на внутренней поверхности трубок парогенератора), давление воды с ростом x , т.е. с ростом температуры, определяемой уравнением (2), будет также уменьшаться пропорционально плотности воды.

$$P_{\text{в}} = \rho_{\text{в}} \frac{v_{\text{в}}^2}{2}. \quad (10)$$

При формулировке уравнения переноса пара по паропроводу, также необходимо учитывать радиальный диффузионный член, полагая, что перенос пара имеет характер турбулентного потока, который будет определяться адвективной составляющей вдоль оси паропровода, который мы представили прямолинейным отрезком, расположенным горизонтально, скоростью генерации пара и его временем жизни (в паропроводу) до выброса на турбину. Однако, диффузионным членом в направлении переноса, очевидно, также можно пренебречь, учитывая, что скорость переноса за счёт турбулентной диффузии пара значительно меньше его скорости, обусловленной адвективной составляющей. Таким образом, если обозначить массу пара через $m_{\text{п}} = \rho_{\text{п}} \cdot V_{\text{пр}}$, где $V_{\text{пр}}$ – внутренний объём паропровода ($V_{\text{пр}} = \pi R^2 \cdot L$), то уравнение переноса для плотности пара по паропроводу (в цилиндрической геометрии) при его радиальной (поперечной) скорости равной нулю будет иметь вид.

$$\frac{d\rho_{\text{п}}}{dt} + v_{\text{п}} \frac{d\rho_{\text{п}}}{dx} - u_{\text{н}} \frac{S_{\text{п}}}{V_{\text{пр}}} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r K_{\text{п}} \frac{\partial \rho_{\text{п}}}{\partial r} \right] - \frac{\rho_{\text{п}}}{\tau_{\text{п}}}, \quad (11)$$

где v_n – продольная скорость переноса пара по паропроводу; u_n – ранее определённая формулой (7) скорость генерации пара; S_n – площадь парообразования ($S_n \sim 2\pi R_0 L_0$); $K_n(r)$ – коэффициент турбулентной диффузии пара; $\tau_n = L/v_n$ – время «жизни» пара в трубопроводе*; L – длина паропровода. Граничные условия определяются, исходя из следующих соображений.

Значение плотности пара в пограничной области $\rho_n(L_0)$, т.е. при $x = L_0$, можно найти, используя условия равенства давления воды и пара в этой области при заданной температуре, т.е. $P_v|_{x=L_0} = P_n|_{x=L_0}$. Поскольку давление воды при найденной зависимости плотности воды от температуры (координаты x), определено выражениями (2), (9), (10), то рассматривая пар как идеальный газ и используя уравнение Клапейрона-Менделеева, найдём, что:

$$\rho_n \left[\left(\frac{v_n^2}{2RT} \right) \right]_{x=L_0} = \rho_v \left[\left(\frac{v_v^2}{2RT} \right) \right]_{x=L_0}, \quad (12)$$

где $v_v = \text{const.}$, определенная формулой (6), зависимость $T(x)$ – выражением (2), а $\rho_v[T(x)]$ – формулой (9). Ниже будет показано, как конкретно воспользоваться условием (12) для определения значения $x = L_0$. Пренебрегая потерями тепла в металлической трубе паропровода, будем полагать, что температурное распределение в паре паропровода будет определяться распределением вида (2), которое и будет определять граничное условие (13):

$$\rho_n(r, T)_{r=R_0} = \rho_n(R_0, T), \quad (13)$$

$$\left. \frac{\partial \rho_n}{\partial r} \right|_{r=0} = 0. \quad (14)$$

Граничное условие (14) также будет соответствовать условию экстремума в плотности распределении пара в паропровode в силу свойства её радиальной симметрии.

Для строгого определения коэффициента турбулентной диффузии $K_n(r, x)$ необходимо рассматривать систему нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных типа уравнений Рейнольдса [4], описывающих перенос той или иной среды в соответствующих условиях, что существенно усложнит расчёты. Поэтому, ограничиваясь стационарными условиями переноса пара, сравним по модулю второй член в левой части уравнения (11), определяющий адвективную составляющую скорости выброса газа из паропровода, и первый член в правой части этого же уравнения, определяющий скорость турбулентной диффузии при переносе. Для оценки указанных величин, полагая, что характерные приращения $dx \sim dr \approx r \approx R_0$, необходимо учитывать, что масштаб турбулентных пульсаций также не может быть больше максимального радиуса паропровода R_0 . В этом случае коэффициент турбулентности $K_n(r)$ можно оценить величиной равной $K_n \approx \left(\frac{R_0 v_n}{L} \right) \cdot L/v_n$. При этих условиях для элемента массы пара Δm будет выполняться неравенство $v_n \gg v_n(R_0/L)$, что совершенно справедливо, поскольку $R_0/L \ll 1$. Таким образом, полагая, что выполняется неравенство:

* При понижении температуры время жизни пара будет определяться временем, которое необходимо для его конденсации, т.е. будет зависеть от температуры среды.

$$\left| v_n \frac{d\rho_n}{dx} \right| \gg \left| \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r K_n \frac{\partial \rho_n}{\partial r} \right] \right|, \quad (15)$$

вместо уравнения (11) с учётом выражения для плотности пара получим следующее уравнение для его плотности:

$$v_n \frac{d\rho_n}{dx} = u_n \frac{S_n}{V_{\text{ип}}} - \frac{\rho_n}{L} v_n, \quad (16)$$

В данном уравнении скорости как переноса пара v_n , так и его генерации (при испарении воды) u_n зависят от его температуры и давления. В качестве оценки скорости переноса пара можно воспользоваться формулой Сен-Венана, определяющей истечение газа из резервуара в атмосферу как функции его температуры и давления [5, 6]:

$$v_n = \sqrt{\left[\frac{k}{k-1} R T_n \right] \left[\frac{P_{\text{ат}}}{P_n} \right]^{\frac{k-1}{k}}}, \quad (17)$$

где k – постоянная адиабаты водяного пара;

R – газовая постоянная (Дж/моль·К);

T_n – температура пара на выходе из паропровода (К); $P_{\text{ат}}$ – атмосферное давление;

P_n – давление пара на выходе из паропровода. Решение уравнения (16) имеет вид:

$$\rho_n = \frac{u_n}{v_n} \frac{2}{r_0} \left[1 - \exp\left(-x/L\right) \right] + \rho_n \left(0 \right) \exp\left(-x/L\right), \quad (18)$$

где $u_n(T)$ определено формулой (7), а $v_n(T)$ – формулой (17). Решение (18) будет полностью справедливо при «квазистационарном» приближении изменения скорости генерации пара и скорости его переноса как функций температуры $T(x)$, т.е. когда функции $u_n[T(x)]$ и $v_n[T(x)]$ или их отношение слабо зависят от x . Если последнее справедливо, то величину $\rho_n(L_0)$ можно определить по результатам измерений параметров пара при его выходе на турбину, т.е. при $x = L$. Действительно, в этой точке могут быть измерены давление пара, его температура, по данным рисунка 5, таблицы 2, формулам (7) и (17) параметры $u_n(T)$, $v_n(T)$, а по уравнению Клапейрона-Менделеева, рассматривая пар как идеальный газ, определена плотность пара $\rho_n(L)$. Таким образом из уравнения (18) при $x = L$ может быть найдена постоянная $\rho_n(L_0)$. При этом граничное условие (12) превращается в уравнение:

$$\rho_n \left(L_0 \right) \left[1 - \rho_n \left(L_0 \right) \frac{v_n^2}{2RT} \right]_{x=L_0} = 0.$$

Решение этого уравнения, например, методом касательных или путём подбора определённого значения x , удовлетворяющего решению уравнения, позволит найти искомое значение пограничной области L_0 или области протечки.

Поскольку период полураспада ^{16}N весьма мал, то при формулировке уравнения переноса радиоактивного азота $^{16}\text{N}_7$ по паропроводу необходимо рассматривать его во времени, учитывая локальную генерацию в пограничной области вода-пар, уменьшение в результате радиоактивного распада и, кроме того, наличие радиоактивного азота в объёме пара, распространившегося в последнем в предыдущие моменты времени. При этом величина плотности пара определится решением (18) уравнения (16). Объёмная активность радиоактивного азота ^{16}N , содержащегося в паровой фазе, и выходящего на турбину $Q_M(L)$ может быть определена путём её измерения на выходе за определённый

промежуток времени τ_N , за который определяют и выход массы пара m_n (воды). Тогда отношение $Q_N \ll m_n \gg \alpha$, определит размерный коэффициент α (Ки/кг), в области выхода пара на турбину, т.е. при $x = L$.

Генерация радиоактивного азота, аналогично выбросам из вендруб радионуклидов ИРГ в атмосферу [7], может быть представлена мощностью вброса $^{16}\text{N}_7$ в паровую фазу, которая определяется следующим выражением:

$$P_B = G \cdot Q_{0\text{пр}}, \quad (19)$$

где G – секундный расход [$\text{м}^3/\text{с}$] или [$\text{л}/\text{час}$];

$Q_{0\text{пр}}$ – объёмная активность радиоактивного азота [$\text{Ки}/\text{м}^3$] или [$\text{Бк}/\text{л}$].

Если объёмную активность $^{16}\text{N}_7$ измерить на выходе из паропровода, то в его начальной точке ($x = L_0$), т.е. в области его генерации, значение начальной объёмной активности $Q_{0\text{пр}}$ может быть найдено с поправкой на радиоактивный распад $^{16}\text{N}_7$. Секундный расход G вброса радиоактивного азота ^{16}N в паровую фазу в пограничной области вода-пар представляет собой произведение площади пограничной области паропровода $S_{\text{пг}} = 2\pi R_0 l_{\text{вр}}$, где $l_{\text{вр}}$ – ширина пограничной области вода-пар (water-vapour region), на скорость выхода радиоактивного азота из трещин $U_{\text{г}}$, представляющей собой искомую величину:

$$G = 2\pi R_0 l_{\text{вр}} \cdot U_{\text{г}}. \quad (20)$$

Величину $l_{\text{вр}}$ можно оценить по показанию расходомера, т.е. по величине продвижения «хода» воды в трубе водопровода на его начальном участке при флуктуации в нём давления воды, которое также может быть измерено по показанию манометра. Действительно, если при некотором давлении воды $P_{\text{в},1}$ мы нашли соответствующее значение $x_1 = L_0$, при котором граничное условие (12) представляет собой уравнение, то при давлении воды $P_{\text{в},2} > P_{\text{в},1}$, аналогично, измеряя соответствующие параметры, найдём, что они характерны для значения $x_2 = L_0 + l_{\text{вр}}$. При этом величина $l_{\text{вр}} = x_2 - x_1$ будет зависеть от разности измеряемых давлений воды. Значение объёмной активности радиоактивного азота ^{16}N $Q_{0\text{пр}}$ при его генерации через пограничную область паропровода должно определяться его объёмной активностью в объёме парогенератора (см. рис.1), из которого через трещины пограничной области вода-пар он поступает во второй. Поскольку величина $Q_{0\text{пр}}$ тоже неизвестна, то общее произведение, определяемое формулой (19), будет в общем случае представлять собой искомую постоянную P_B . В этом случае перенос радиоактивного азота ^{16}N в паропроводе может быть описан следующим уравнением:

$$\frac{dQ_N}{dt} = P_B \eta(x - L_0) - \eta(x - L_0 + l_{\text{вр}}) v_{\text{п}} V_{\text{тр}} \alpha \frac{d\rho_{\text{п}}}{dx} - \lambda Q_N, \quad (21)$$

где L_0 – длина водопровода. В уравнении (21) первый член в правой части описывает генерацию радиоактивного азота ^{16}N в пограничной области вода-пар шириной $l_{\text{вр}} \ll L_0$; $\eta(x)$ – единичная функция; второй – убыль радиоактивного азота, содержащегося в паре, за счёт выноса последнего по паропроводу на турбину, третий – убыль радионуклида за счёт радиоактивного распада азота ^{16}N с постоянной распада λ . Вынос радиоактивного азота с паром из паропровода, представленного вторым членом в формуле (21), зависит от адвективной скорости, определяемой формулой (17), для азота, строго говоря, должен быть несколько отличным от пара, поскольку постоянная адиабаты в формуле (17) для азота и пара отличаются [8, 9] (табл. 3).

Таблица 3 – Показатели адиабаты *k* для различных температур и газов [Indicators of adiabat *k* for various temperatures and gases] [8, 9]

темп.	газ	k	темп.	газ	k	темп.	газ	k
-181 °C	H ₂	1,597	200 °C	сухой воздух	1,398	20 °C	NO	1,400
-76 °C		1,453	400 °C		1,393	20 °C	N ₂ O	1,310
20 °C		1,410	1000 °C		1,365	-181 °C	N ₂	1,470
100 °C		1,404	2000 °C		1,088	15 °C		1,404
400 °C		1,387	0 °C	CO ₂	1,310	20 °C	Cl ₂	1,340
1000 °C		1,358	20 °C		1,300	-115 °C	CH ₄	1,410
2000 °C		1,318	100 °C		1,281	-74 °C		1,350
20 °C		He	1,660		400 °C	1,235		20 °C
20 °C	H ₂ O	1,330	1000 °C	1,195	15 °C	NH ₃	1,310	
100 °C		насыщенный	1,324	20 °C	CO	1,400	19 °C	Ne
200 °C	водяной пар	1,310	-181 °C	O ₂	1,450	19 °C	Xe	1,660
-180 °C	Ar	1,760	-76 °C		1,415	19 °C	Kr	1,680
20 °C		1,670	20 °C		1,400	15 °C	SO ₂	1,290
0 °C	сухой воздух	1,403	100 °C		1,399	360 °C	Hg	1,670
20 °C		1,400	200 °C		1,397	15 °C	C ₂ H ₆	1,220
100 °C		1,401	400 °C		1,394	16 °C	C ₃ H ₈	1,130

Поскольку в формуле (17) давление пара (см. рис. 1) значительно больше атмосферного давления, то скорости выхода пара и азота ¹⁶N будут, в основном, определяться их температурой и значением постоянной адиабаты. Поэтому, используя данные табл.3 для азота и насыщенного пара при T = 20 °C (H₂O) и T = 15 °C (N₂), найдём, что относительная погрешность скорости выброса азота ¹⁶N относительно пара составит не больше 7%, т.е. в пределах погрешности измерения скорости выброса пара. Последнее позволяет принять, это отличие незначительным и считать, что и вынос радиоактивного азота ¹⁶N из паропровода происходит со скоростью выноса пара.

Решение уравнения (21) найдём, используя метод преобразования Лапласа [10], представляя функцию Q_N(x, t) в виде изображения F(x, p), определяемого выражением:

$$F(x, p) = \left\{ P_b \left[\eta \left(x - L_0 \right) - \eta \left(x - L_0 + l_{vr} \right) \right] v_n V_{tp} \alpha \left[\frac{\rho_n \left(x_0 \right)}{L} - \frac{u_n S_n}{v_n V_{tp}} \right] \exp \left(-x/L \right) \right\} / \left(p \left(\lambda + \lambda \right) + Q_N \left(x_0 \right) \left(\lambda + \lambda \right) \right),$$

а искомый оригинал – решением уравнения (21), которое при L₀ ≤ x ≤ L принимает вид:

$$Q_N(x, t) = \frac{\left\{ P_b \left[\eta \left(x - L_0 \right) - \eta \left(x - L_0 + l_{vr} \right) \right] v_n V_{tp} \alpha \left[\frac{\rho_n \left(x_0 \right)}{L} - \frac{u_n S_n}{v_n V_{tp}} \right] \exp \left(-x/L \right) \right\}}{\lambda} \left[1 - \exp \left(-\lambda t \right) + Q_N \left(x_0 \right) \exp \left(-\lambda t \right) \right]. \quad (22)$$

При найденной функции объёмной активности пара Q_N(x, t) и плотности пара, определяемой формулой (18), целесообразно уточнить ранее введённый параметр α, который был получен на выходе паропровода в точке x = L, исключая протечку, поскольку P_b(x) ≠ 0, L₀ + l_{vr} ≤ x ≤ L, в момент времени, соответствующий выходу пара из паропровода на турбину t = τ_n = L/v_n:

$$\alpha = \frac{Q_N(x, \tau_n)}{m_n(x)} = \frac{v_n V_{tp} \alpha \left[\frac{\rho_n \left(x_0 \right)}{L} - \frac{u_n S_n}{v_n V_{tp}} \right] \left[1 - \exp \left(-\lambda \tau_n \right) + \frac{Q_N \left(x_0 \right) \exp \left(-\lambda \tau_n \right)}{L \frac{u_n S_n}{v_n} \left[1 - 1 + V_n \rho_n \left(x_0 \right) \right]} \right]}{\left(L \frac{u_n S_n}{v_n} \left[1 - 1 + V_n \rho_n \left(x_0 \right) \right] \right)}$$

где e – основание натурального логарифма.

Если из полученного уравнения найти параметр α [Ки/кг], то, таким образом, найдём, что этот параметр действительно зависит от начальных значений пара, объёмной активности, давления воды, скорости переноса, т.е. давления и температуры в паропроводе и скорости генерации пара, что и предполагалось при его определении.

$$\alpha = Q_N \cdot \exp(-\lambda \tau_{\text{п}}) \cdot \left\{ \left(L \frac{u_{\text{п}}}{v_{\text{п}}} S_{\text{п}} - 1 + V_{\text{п}} \rho_{\text{п}} \right) - v_{\text{п}} V_{\text{тр}} \left[\frac{\rho_{\text{п}}}{L} - \frac{u_{\text{п}}}{v_{\text{п}}} \frac{S_{\text{п}}}{V_{\text{тр}}} \right] \frac{1 - \exp(-\lambda \tau_{\text{п}})}{\lambda} \right\} \quad (23)$$

С другой стороны, если $\rho_{\text{п}}(x)$ – плотность распределения радиоактивного пара в паропроводе, а $Q_N(x, t)$ – функция распределения объёмной активности в паропроводе (Ки), то величина мощности дозы, создаваемой пакетом паропроводов с радиоактивным азотом ^{16}N в некоторой заданной точке $P(x_0, y_0, z_0)$ с учётом поправок на плотность пара в коэффициентах передачи энергии и линейного ослабления, определится функционалом, заданным на поле решений относительно распределения радиоактивной примеси, и будет содержать мощность вброса ^{16}N , т.е. (протечку) $P_{\text{в}}$ (Ки/с).

$$D'_N(x_0, y_0, z_0) = N K E_N v_N \mu_a \int_V Q_N(x, t) B(E_N, R) \frac{\exp(-\mu R)}{R^2} dV, \quad (24)$$

где N – число паропроводов, составляющих общий источник пара;

K – размерный коэффициент ($K = 1,456 \cdot 10^3$ мЗв/час);

E_N – энергия γ -излучения (МэВ);

v_N – квантовый выход γ -излучения азота ^{16}N ;

μ, μ_a – линейный коэффициент и коэффициент передачи энергии γ -излучения (м^{-1}) соответственно;

$B(E_N, R)$ – фактор накопления γ -излучения;

$$R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \text{ (м)};$$

x, y, z – текущие координаты;

x_0, y_0, z_0 – координаты точки наблюдения, $dV = dx dy dz$;

V – область определения функции.

Сравнивая измеренную величину мощности дозы, создаваемой γ -излучением азота ^{16}N в некоторой точке $P(x_0, y_0, z_0)$ на выходе пара на турбину, и её численное значение по формуле (24), мы определим **искомую величину протечки** $P_{\text{в}}$. Если оценку мощности дозы проводить в точке выхода пара из паропровода при $x = L, y = 0; z = 0$, то фактор накопления $B(E_N, R)$ можно принять равным 1, $R = x - L, dV = S dx; S = \pi R_0^2; L_0 \leq x \leq L$; для $t = \tau_{\text{п}} = L/v_{\text{п}}$, тогда вместо выражения (24) получим следующее:

$$D'_N(x_0, y_0, z_0) = N K E_N v_N \mu_a \cdot \frac{\rho_{\text{пар}}}{\rho_{\text{возд}}} \int_{L_0}^{L-L} Q_N(x, t) \frac{\exp(-\mu \cdot \frac{\rho_{\text{пар}}}{\rho_{\text{возд}}} (x - L))}{(x - L)^2} dx, \quad (25)$$

в котором $Q_N(x, t)$ определена формулой (21), в которой множитель $\frac{\rho_{\text{пар}}}{\rho_{\text{возд}}}$ при коэффициентах линейного μ ослабления и передачи энергии μ_a учитывает особенности переноса γ -излучения в паре, в момент времени $t = L/v_{\text{п}}$. Подставляя в (25) выражение $Q_N(x, t)$, определённое формулой (21), и проводя замену $x - L = U, a = \mu \cdot \frac{\rho_{\text{пар}}}{\rho_{\text{возд}}}, b = 1/L$, после несложных преобразований получим:

$$D'_N\left(L, \frac{L}{v_n}\right) = NKE_N v_N \epsilon_N \mu_a \cdot \epsilon_{\text{пар}} / \rho_{\text{возд}} \bar{S} \times \left\{ \begin{aligned} & \frac{\left[1 - \exp\left(-\lambda \frac{L}{v_n}\right)\right]}{\lambda} P_n \times \int_{L_0-L}^{L_0+l_{vr}-L} \frac{\exp\left(-aU\right)}{U^2} dU + \\ & + v_n \frac{V_{\text{тр}} \alpha}{\lambda} \left[1 - \exp\left(-\lambda \frac{L}{v_n}\right)\right] \left(\frac{\rho_n \epsilon_0}{L} - \frac{u_n S_n}{v_n V_{\text{тр}}}\right) e^{-1} \times \int_{L_0-L}^{L_0} \frac{\exp\left[-(a+b)U\right]}{U^2} dU + \\ & + Q_N \epsilon_0 \exp\left(-\lambda \frac{L}{v_n}\right) \times \int_{L_0-L}^{L_0} \frac{\exp\left(-aU\right)}{U^2} dU. \end{aligned} \right. \quad (26)$$

Выполняя интегрирования подынтегральных выражений, в соответствии с [11, 12],

$$\int_{U_1}^{U_2} \frac{\exp\left(-aU\right)}{U^2} dU = \left(\frac{\exp\left(-aU\right)}{U} + aEi\left(-aU\right) \right) \Big|_{U_1}^{U_2},$$

где $Ei(x)$ – интегральная показательная функция [13] и, учитывая область интервала, на котором единичная функция в первом слагаемом в правой части выражения (26) отлична от нуля ($L_0 \leq x \leq L_0 + l_{vr}$), находим:

$$D'_N\left(L, \frac{L}{v_n}\right) = NKE_N v_N \epsilon_N \mu_a \cdot \epsilon_{\text{пар}} / \rho_{\text{возд}} \bar{S} \times \left\{ \begin{aligned} & \frac{\left[1 - \exp\left(-\lambda \frac{L}{v_n}\right)\right]}{\lambda} P_n \times \left\{ \left(\frac{\exp\left[-a\left(L_0-L\right)}{L_0-L} + aEi\left[-a\left(L_0-L\right)\right] \right) - \right. \\ & \left. - \left(\frac{\exp\left[-a\left(L_0+l_{vr}-L\right)}{L_0+l_{vr}-L} + aEi\left[-a\left(L_0+l_{vr}-L\right)\right] \right) \right\} + \\ & + v_n \frac{V_{\text{тр}} \alpha}{\lambda e} \left[1 - \exp\left(-\lambda \frac{L}{v_n}\right)\right] \left(\frac{\rho_n \epsilon_0}{L} - \frac{u_n S_n}{v_n V_{\text{тр}}}\right) \times \left\{ \left(\frac{\exp\left[-(a+b)\left(L_0-L\right)}{L_0-L} + \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. \times Ei\left[-(a+b)\left(L_0-L\right)\right] \right) - \left(\frac{\exp\left[-(a+b)\left(L_0+l_{vr}-L\right)}{L_0+l_{vr}-L} + Ei\left[-(a+b)\left(L_0+l_{vr}-L\right)\right] \right) \right\} Q_N \epsilon_0 \exp\left(-\lambda \frac{L}{v_n}\right) \times \right. \\ & \left. \times \left\{ \left(\frac{\exp\left[-a\left(L_0-L\right)}{L_0-L} + aEi\left[-a\left(L_0-L\right)\right] \right) - \left(\frac{\exp\left[-aL_0}{L_0} + aEi\left[-aL_0\right] \right) \right\} \right. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

где e – основание натурального логарифма.

Полученное решение задачи (27), позволяет непосредственно найти искомое значение протечки P_B , которое представлено множителем в первом слагаемом выражений (27) и (28).

$$\frac{D'_N\left(L, \frac{L}{v_n}\right)}{NKE_N v_N \epsilon_N \mu_a \cdot \epsilon_{\text{пар}} / \rho_{\text{возд}} \bar{S}} = \left\{ \begin{aligned} & \frac{\left[1 - \exp\left(-\lambda \frac{L}{v_n}\right)\right]}{\lambda} P_B \times A_1 + \\ & + v_n \frac{V_{\text{тр}} \alpha}{\lambda e} \left[1 - \exp\left(-\lambda \frac{L}{v_n}\right)\right] \left(\frac{\rho_n \epsilon_0}{L} - \frac{u_n S_n}{v_n V_{\text{тр}}}\right) \times A_2 + \\ & + Q_N \epsilon_0 \exp\left(-\lambda \frac{L}{v_n}\right) \times A_3 \end{aligned} \right\}, \quad (28)$$

где

$$\begin{aligned} A_1 &= \left\{ \left(\frac{\exp\left[-a\left(L_0-L\right)}{L_0-L} + aEi\left[-a\left(L_0-L\right)\right] \right) - \left(\frac{\exp\left[-a\left(L_0+l_{vr}-L\right)}{L_0+l_{vr}-L} + aEi\left[-a\left(L_0+l_{vr}-L\right)\right] \right) \right\}; \\ A_2 &= \left\{ \left(\frac{\exp\left[-(a+b)\left(L_0-L\right)}{L_0-L} + (a+b) \times Ei\left[-(a+b)\left(L_0-L\right)\right] \right) - \left(\frac{\exp\left[-(a+b)\left(L_0+l_{vr}-L\right)}{L_0+l_{vr}-L} + \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. Ei\left[-(a+b)\left(L_0+l_{vr}-L\right)\right] \right) \right\}; \\ A_3 &= \left\{ \left(\frac{\exp\left[-a\left(L_0-L\right)}{L_0-L} + aEi\left[-a\left(L_0-L\right)\right] \right) - \left(\frac{\exp\left[-aL_0}{L_0} + aEi\left[-aL_0\right] \right) \right\}. \end{aligned}$$

При этом параметр P_B , определяемый формулами (19) и (20) ($P_B = Q_N(L_0) 2\pi R_0 l_{vr} \cdot U_G$), непосредственно определится выражением:

$$\lambda \left\{ \frac{D'_N \left(L, \frac{L}{v_n} \right)}{NKE_N v_N E_N \mu_a \cdot \bar{\rho}_{\text{пар}} / \rho_{\text{возд}} S} - \left(v_n \frac{V_{\text{тр}} \alpha}{\lambda e} \left[1 - \exp \left(-\lambda \frac{L}{v_n} \right) \right] \left[\frac{\rho_n L_0}{L} - \frac{u_n S_n}{v_n V_{\text{тр}}} \right] \times A_2 + Q_N L_0 \exp \left(-\lambda \frac{L}{v_n} \right) \times A_3 \right) \right\} = \quad (29)$$

$$= P_b \cdot A_1 = Q_N L_0 \cdot 2\pi R_0 U_r \cdot l_{vr} \cdot \left\{ \left(\frac{\exp \left[-a \frac{L_0 - L}{L_0 - L} \right] + a Ei \left[-a \left(\frac{L_0 - L}{L_0 - L} \right) \right]}{\frac{L_0 - L}{L_0 - L}} \right) - \left(\frac{\exp \left[-a \left(\frac{L_0 + l_{vr} - L}{L_0 + l_{vr} - L} \right) \right] + a Ei \left[-a \left(\frac{L_0 + l_{vr} - L}{L_0 + l_{vr} - L} \right) \right]}{\frac{L_0 + l_{vr} - L}{L_0 + l_{vr} - L}} \right) \right\}.$$

При анализе формулы (29) следует обратить внимание на то, что произведение ширины протечки l_{vr} на коэффициент A_1 является функцией l_{vr} , но поскольку $l_{vr} \ll |L_0 - L|$ то первый член во втором слагаемом в правой части выражения (29) можно разложить в ряд Тейлора. Тогда, ограничиваясь первыми двумя членами разложения и пренебрегая l_{vr} по сравнению с $|L_0 - L|$ в аргументе второго слагаемого, после несложных преобразований получим:

$$\lambda \left\{ \frac{D'_N \left(L, \frac{L}{v_n} \right)}{NKE_N v_N E_N \mu_a \cdot \bar{\rho}_{\text{пар}} / \rho_{\text{возд}} S} - \left(v_n \frac{V_{\text{тр}} \alpha}{\lambda e} \left[1 - \exp \left(-\lambda \frac{L}{v_n} \right) \right] \left[\frac{\rho_n L_0}{L} - \frac{u_n S_n}{v_n V_{\text{тр}}} \right] \times A_2 + Q_N L_0 \exp \left(-\lambda \frac{L}{v_n} \right) \times A_3 \right) \right\} = \quad (30)$$

$$= P_b \cdot A_1 = Q_N L_0 \cdot 2\pi R_0 U_r \cdot l_{vr} \times \left\{ \frac{\exp \left[-a \frac{L_0 - L}{L_0 - L} \right] + a Ei \left[-a \left(\frac{L_0 - L}{L_0 - L} \right) \right]}{\frac{L_0 - L}{L_0 - L}} + 1 - l_{vr} \cdot \left(\frac{\exp \left[-a \frac{L_0 + l_{vr} - L}{L_0 + l_{vr} - L} \right] + a Ei \left[-a \left(\frac{L_0 + l_{vr} - L}{L_0 + l_{vr} - L} \right) \right]}{\frac{L_0 + l_{vr} - L}{L_0 + l_{vr} - L}} + 1 \right) \right\}.$$

При вычислении параметра P_b ширину протечки l_{vr} , необходимо задать (априори) или определить по показанию расходомера, как указывалось ранее, после чего и вычислять P_b .

Следует отметить, что ширину протечки или её площадь можно уменьшить, повышая чувствительность обратной связи автоматизированной системы паропровод – вода. Действительно, повышение чувствительности детекторов, регулирующих этот процесс, приведет к уменьшению «хода» (флуктуации) воды в пограничной области вода-пар, что, естественно, приведёт к уменьшению ширины протечки l_{vr} и, в конечном итоге, её площади.

Определяя величину P_b , и, используя формулу (23), при заданном параметре α , находим начальную объёмную активность азота ^{16}N $Q_N(L_0) = Q_{0\text{пр}}$. Далее воспользовавшись формулами (19) и (20), находим секундный расход $G = 2\pi R_0 l_{vr} \cdot U_r$ или, при заданной l_{vr} , величину скорости генерации азота ^{16}N U_r . Следует отметить, что найденная начальная объёмная активность азота ^{16}N $Q_{0\text{пр}}$ представляет собой значение объёмной активности азота в трубе паропровода. Значение же объёмной активности азота ^{16}N в парогенераторе Q_0 , при условии его равномерного распределения по объёму парогенератора, может быть найдено путём сравнения результатов измерений и расчётов мощности дозы от объёмного источника, представляющего собой парогенератор, на его поверхности с учётом ослабления γ -излучения материалом защитной оболочки, используя численные методы или метод Монте-Карло [7, 14]. При необходимости учёта неравномерного распределения азота ^{16}N в объёме парогенератора, следует использовать систему стационарных нелинейных уравнений типа уравнений Рейнольдса, совместно с пространственно-временным уравнением переноса азота ^{16}N [7]. Решение подобной системы позволит получить пространственное распределение радионуклида, используя которое можно уточнить характер протечки, её величину и её особенности. При этом для повышения точности и корректности измерений на присутствие азота ^{16}N в парогенераторе необходимо

предварительно провести спектрометрические измерения на наличие в нём иных радионуклидов в отличие от азота ^{16}N , используя для этих целей высокочувствительный спектрометр на сжатом ксеноне [15, 16] с рабочим диапазоном температур от -20 до 180 °С. В этом случае найденное значение $Q_{0\text{пр}}$ в паропроводе будет отличаться от вычисленного значения Q_0 на величину коэффициента экстинкции, который можно представить в виде $K_{\text{экс}} = \exp(-\lambda_{\text{пр}}t_{\text{пр}})$, т.е. определить $Q_{0\text{пр}}$ в виде: $Q_{0\text{пр}} = Q_0 \cdot \exp(-\lambda_{\text{пр}}t_{\text{пр}})$, что при известной толщине паропровода $t_{\text{пр}}$ позволит найти постоянную экстинкции $\lambda_{\text{пр}}$, а в дальнейшем выбрать материал паропровода с максимальной $\lambda_{\text{пр}}$ (наименьшим $K_{\text{экс}}$). При этом величина протечки вместо (19), определится выражением:

$$P_{\text{в}} = Q_0 \cdot \exp(-\lambda_{\text{пр}}t_{\text{пр}}) \cdot 2\pi R_0 l_{\text{вр}} U_{\text{г}}. \quad (31)$$

При измерении искомых величин, таких как, например, мощность дозы, создаваемая ^{16}N , его объёмная активность, плотность пара и его начальная плотность, коэффициент α и т.д., следует иметь в виду, что измеряемые параметры находят с определённой погрешностью, поэтому варьируя те или иные величины в рамках погрешностей измерения указанных величин, последние всегда можно уточнить. Например, в формуле (27) величинами, подлежащими уточнению являются поверхность испарения $S_{\text{п}}$ и начальная плотность пара $\rho_{\text{п}}(L_0)$, давление пара $P_{\text{п}}$ и его температура $T_{\text{п}}$, ширина пограничной области вода-пар $l_{\text{вр}}$, длины паропровода L и водопровода L_0 . Внесение поправок в эти величины даст возможность уточнить оценку искомой величины **протечки**. Однако при всех изменениях параметров значения измеряемых величин: мощности дозы и объёмной активности должны оставаться в пределах погрешности их измерений, используя это требование в качестве критерия, которому необходимо следовать. Чтобы уменьшить погрешность при измерении этих величин целесообразно использовать детекторы γ -излучения с высоким температурным диапазоном их работы [17]. Приведенные оценки протечки справедливы только для вида парогенератора, указанного на рисунках 1 и 2.

Таким образом, проводя измерения мощности дозы при выходе пара на турбину, и, измеряя в этой точке объёмную активность ^{16}N и массу пара за время прохождения $\tau_{\text{п}}$ по паропроводу, ширину пограничной области $l_{\text{вр}}$ – по показанию расходомера, а также давление, температуру пара и воды и, проводя измерение мощности дозы, создаваемой азотом ^{16}N в объёме первого контура, а также измерение и расчёты мощности дозы на его поверхности, на основе предложенного метода можно оценить протечку азота ^{16}N во второй контур из первого, провести оценку выброса радиоактивного азота ^{16}N на турбину, минимизировать его протечку путём выбора соответствующих сплавов, используемых для паропроводов в парогенераторе, и, наконец, разработать соответствующие меры радиационной безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деев, В. И. Основы расчета судовых ЯЭУ / В. И. Деев, Н. В. Шукин, А. Л. Черезов ; под общей редакцией профессора В. И. Деева. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2012. – 256 с.
2. Никитин, А. Плавающие атомные станции / А. Никитин, Л. Андреев. – Доклад объединения Bellona, 2011. – Санкт-Петербург : Сезам-принт, 2011. – 48 с.
3. Воробьёв, И. Н. Экспериментальные исследования по определению значений скорости испарения и кипения / И. Н. Воробьёв, А. А. Хашенко // Молодёжный и научный форум: Естественные и медицинские науки: электронный сборник статей по материалам II Международной студенческой научно-практической конференции № 2 (2). Научный форум. – URL : https://nauchforum.ru/archive/mnf_nature/2.pdf (дата обращения: 16.01.2019).
4. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – Москва : Наука, 1987. – 824 с.

5. *Сарданашивили, С. А.* Расчётные методы и алгоритмы (трубопроводный транспорт газа) / С. А. Сарданашивили. – Москва : Нефть и газ, 2005. – 577 с.
6. *Кириллин, В. А.* Техническая термодинамика / В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейндлин. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2017. – 496 с.
7. *Елохин, А. П.* Методы и средства систем радиационного контроля окружающей среды / А. П. Елохин; монография. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2014. – 520 с.
8. White, F. Fluid Mechanics. Moscow : 4th ed. McGraw Hill. https://www.academia.edu/17983721/FLUID_MECHANICS_4th_Ed._Frank_M._White_-_University_of_Rode_Island.
9. Lange's Handbook of Chemistry. 10th ed. 1524 p. McGraw-Hill Book Company. New York.
10. *Бронштейн, И. Н.* Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – Москва : Наука, 1980. – 976 с.
11. *Брычков, Ю. А.* Таблицы неопределённых интегралов / Ю. А. Брычков, О. И. Маричев, А. П. Прудников. – Москва : Наука, 1986. – 192 с.
12. *Прудников, А. П.* Интегралы и ряды / А. П. Прудников, Ю. А. Брычков, О. И. Маричев. – Москва : Наука. – 1981. – 800 с.
13. Справочник по специальным функциям / под редакцией М. Абрамовица и И. Стигана. – Москва : Наука, 1979. – 832 с.
14. *Елохин, А. П.* Метод оценки последствий радиационных аварий в помещениях реакторного блока на АЭС с реактором ВВЭР-1000 / А. П. Елохин, А. Н. Хмылев, М. В. Жилина // Атомная энергия. – 2007. – Т. 102, Вып. 4. – С. 254-262.
15. *Власик, К. В.* / Автоматизированная система на основе ксеноновых гамма-спектрометров для контроля газообразных радиоактивных выбросов ядерного реактора / Власик К.В. [и др.] // Ядерные измерительно-информационные технологии. – 2004. – № 2 (10). – С. 45-53.
16. *Елохин, А. П.* Автоматизированные системы контроля радиационной обстановки окружающей среды / А. П. Елохин. – Москва : Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2012. – 316 с.
17. *Елохин, А. П.* Метод экспресс-оценки средней энергии спектра γ -излучения радионуклидов в условиях радиационных аварий в помещениях спецкорпуса АЭС / А. П. Елохин, А. И. Ксенофонтов, Исса Алалем, С. Н. Федорченко // Глобальная ядерная безопасность. – 2018. – № 2 (27). – С. 7-15.

REFERENCES

- [1] Deev V.I., Shhukin N.V., Cherezov A.L. Osnovy` rascheta sudovy`x YaE`U [Fundamentals of Calculation of NPP Ship: Tutorial]. Pod obshhej redakciej prof. V.I. Deev [Edited by prof. V.I. Deev] Moscow: NRNU MIPhI. 2012. 256 p. (in Russian).
- [2] Nikitin A. Plavuchie atomny`e stancii [Floating Nuclear Power Plants]. Doklad ob``edineniya Bellona [Report of the Bellona Association]. St. Petersburg: Sezam-print, 2011. 48 p. (in Russian).
- [3] Vorob`yov I.N. E`ksperimental`ny`e issledovaniya po opredeleniyu znachenij skorosti ispareniya i kipeniya [Experimental Studies to Determine the Values of the RATE of Evaporation and Boiling]. Molodyozhny`j i nauchny`j forum: Estestvenny`e i medicinskie nauki: e`lektronny`j sbornik statej po materialam II mezhdunarodnoj studencheskoj nauchno-prakticheskoy konferencii № 2(2) [Youth and Scientific Forum: Natural and Medical Sciences: an electronic collection of articles based on the materials of the II International Student Scientific and Practical Conference № 2 (2)]. Nauchny`j forum [Scientific forum]. – URL: https://nauchforum.ru/archive/mnf_nature/2.pdf (in Russian).
- [4] Lojczyanskij L.G. Mexanika zhidkosti i gaza [Fluid and Gas Mechanics]. Moscow: Science. 1987. 824 p. (in Russian).
- [5] Sardanashvili S.A. Raschyotny`e metody` i algoritmy` (truboprovodny`j transport gaza). [Calculation Methods and Algorithms (Pipeline Gas Transportation)]. Moscow: Oil & Gas. 2005. 577 p. (in Russian).
- [6] Kirillin V.A., Sy`chev V.V., Shejndlin A.E. Texnicheskaya termodinamika [Technical Thermodynamics. Textbook for universities] Moscow : Publishing House MEI. 2017. 496 p. (in Russian).
- [7] Eloxin, A.P. Metody` i sredstva sistem radiacionnogo kontrolya okruzhayushhej sredy` [Methods and Means of Environmental Radiation Monitoring Systems]. Monografiya [monograph]. Moscow: NIYaU MIFI. 2014. 520 p. (in Russian).
- [8] White, F. Fluid Mechanics. Moscow : 4th ed. McGraw Hill. https://www.academia.edu/17983721/FLUID_MECHANICS_4th_Ed._Frank_M._White_-_University_of_Rode_Island.
- [9] Lange's Handbook of Chemistry. 10th ed. 1524 p. McGraw-Hill Book Company. New York.

- [10] Bronshtejn, I.N. Spravochnik po matematike [Handbook of Mathematics]. Moscow: Science. 1980. 976 p. (in Russian).
- [11] Bry`chkov, Yu.A. Tablicy neopredelyonny`x integralov [Tables of Indefinite Integrals]. Moscow: Science. 1986. 192 p. (in Russian).
- [12] Prudnikov, A.P. Integraly` i ryady` [Integrals and Series]. Moscow: Science. 1981. 800 p. (in Russian).
- [13] Spravochnik po special`ny`m funkciyam. [Handbook of Special Functions]. Pod redakciej M. Abramovicza i I. Stigana. Moscow: Science. 1979. 832 p. (in Russian).
- [14] Eloxin, A.P. Metod ocenki posledstvij radiacionny`x avarij v pomeshheniyax reaktornogo bloka na AE`S s reaktorom VVE`R-1000 [Method for Assessing the Consequences of Radiation Accidents in the Premises of a Reactor Unit at NPPs with a WWER-1000 Reactor]. Atomnaya e`nergiya [Nuclear Energy]. 2007. T. 102. V. 4. P. 254-262 (in Russian).
- [15] Vlasik, K.V. Avtomatizirovannaya sistema na osnove ksenonovy`x gamma-spektrometrov dlya kontrolya gazoobrazny`x radioaktivny`x vy`brosov yadernogo reaktora [Automated System Based on Xenon Gamma Spectrometers for Monitoring Gaseous Radioactive Emissions of a Nuclear Reactor]. Yaderny`e izmeritel`no-informacionny`e texnologii [Nuclear Measurement and Information Technologies]. 2004. № 2 (10). P. 45-53 (in Russian).
- [16] Eloxin, A.P. Avtomatizirovanny`e sistemy` kontrolya radiacionnoj obstanovki okruzhayushhej sredy` [Automated Systems for Monitoring the Radiation Environment of the Environment. Textbook for university students]. Moscow: National Research Nuclear University MEPhI. 2012. 316 p. (in Russian).
- [17] Eloxin, A.P. Metod e`kspress-ocenki srednej e`nergii spektra γ -izlucheniya radionuklidov v usloviyax radiacionny`x avarij v pomeshheniyax speczkorpusa AE`S [The Method of Rapid Assessment of the Average Energy of the Spectrum of γ -Radiation of Radionuclides under Conditions of Radiation Accidents in the Premises of a Special Building of Nuclear Power Plants]. Global`naya yadernaya bezopasnost` [Global Nuclear Safety]. 2018 № 2 (27). P. 7-15 (in Russian).

The Method of Assessment of Radioactive Nitrogen ^{16}N Leaks in Steam Generators Used at Nuclear Reactors of KLT-40 Type

A.P. Eloxin^{*1}, S.N. Fedorchenko^{*2}

**National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute (NRNU MEPhI), Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409*

***The joint - stock company «Specialized Scientific and Research Institute of Instrumentation» (JSC «SNIIP»), Raspletin St., 5, Moscow, Russia 123060*

¹ORCID iD: 0000-0002-7682-8504

WoS Researcher ID: G-9573-2017

e-mail: elokhin@yandex.ru

²ORCID iD: 0000-0001-6144-915X

WoS Researcher ID: F-3804-2018

e-mail: info@sniip.ru

Abstract – The paper considers the leakage of the radionuclide of nitrogen $^{16}\text{N}_7$ ($T_{1/2}=7,11$ с, $E_{\gamma,\text{max}}=6,134$ МэВ, $\nu_{\gamma,\text{max}}=69\%$) arising in the 1st loop of the KLT-40 reactor used on icebreakers and floating units (PEB), through the steam generator to the second circuit into which water flows under pressure P_b , with temperature T_b , heats up with the formation of radioactive steam, the output of which is carried out through the spiral steam line of steam generator under high pressure P_n . The content of the specified radionuclide in a pair can be detected and assessed by applying the methods of γ -radiation spectrometry, measuring the volumetric γ -activity of steam, measuring the dose rate of γ -radiation of steam and using a computational model using a simple mathematical apparatus to determine the leakage region. The work identifies the main areas in the design of the steam generator, which can be used to measure radiation characteristics and methods for their assessment.

Keywords: power reactor, radionuclide, steam generator, pressure temperature, dose rate, radiation safety.

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 621.039

**АНАЛИЗ ДИНАМИКИ РАДИАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ РЕГИОНА
РАСПОЛОЖЕНИЯ РОСТОВСКОЙ АЭС**

© 2019 И.А. Бубликова, О.Ф. Цуверкалова

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

Актуальность работы определяется опасениями населения региона размещения Ростовской АЭС о повышении радиационных параметров среды. Методами регрессионного анализа была выполнено исследование динамики средних и максимальных значений суммарной β -активности приземного слоя воздуха и атмосферных выпадений, полученных при государственном радиационном мониторинге. Показано, что эксплуатация энергоблока № 1 в течение 17 лет, пуски новых блоков не привели к росту анализируемых параметров. Анализ данных по продуктам питания местного производства показал, что зона наблюдения Ростовской АЭС, а также Ростовская область в целом, не отличается повышенным содержанием основных долгоживущих техногенных радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr по сравнению с Волгоградской областью. Значения суммарной β -активности продуктов питания, выращенных на территории размещения атомной станции, находятся ниже показателей «нулевого фона».

Ключевые слова: Ростовская АЭС; Цимлянск, Ростов-на-Дону, суммарная β -активность; атмосферные выпадения; приземной слой атмосферы; продукты питания местного производства, техногенные радионуклиды, радиационный мониторинг, зона наблюдения, Ростовская область, Волгоградская область.

Поступила в редакцию 26.08.2019
После доработки 29.08.2019
Принята к публикации 03.09.2019

Развитие атомной отрасли сопровождается опасениями населения, проживающего на территориях размещения радиационно-опасных объектов (РОО), о росте радиационных факторов среды, которые могут негативно повлиять на здоровье. Несмотря на высокие показатели радиационной безопасности эксплуатации Ростовской АЭС (РоАЭС), пуск первого энергоблока которой состоялся в 2001 г., существенная часть местных жителей уверена в том, что эксплуатирующиеся в настоящее время четыре энергоблока атомной станции оказывают неблагоприятное воздействие как на окружающую среду, так и на их здоровье. В связи с этим, в работе поставлена цель – выполнить анализ динамики параметров, характеризующих радиационные факторы среды. В работе использовались результаты государственного мониторинга радиационной обстановки на территории России, проводимого Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, и радиационно-гигиенического мониторинга, осуществляемого подразделениями Роспотребнадзора, находящиеся в открытом доступе на официальных сайтах соответствующих организаций [1-3].

В качестве параметров, характеризующих радиационные факторы атмосферы, были выбраны суммарная β -активность атмосферных выпадений, объемные значения суммарной β -активности в приземном слое воздуха. На территории Ростовской области в зоне наблюдения РоАЭС подразделением Росгидромета мониторинг радиационной

обстановки осуществляется в г. Цимлянске (21 км от атомной станции). Для сравнения были взяты соответствующие значения для Ростова-на-Дону (более 200 км от РоАЭС) и г. Нововоронеж, располагающийся на территории размещения другого РОО – Нововоронежской АЭС, эксплуатирующей энергоблоки с 1964 года. Период анализа динамики: с января 2008 г. по декабрь 2018 года.

Динамика среднемесячных значений суммарной β -активности атмосферных выпадений по сравниваемым территориям представлена на рисунке 1.

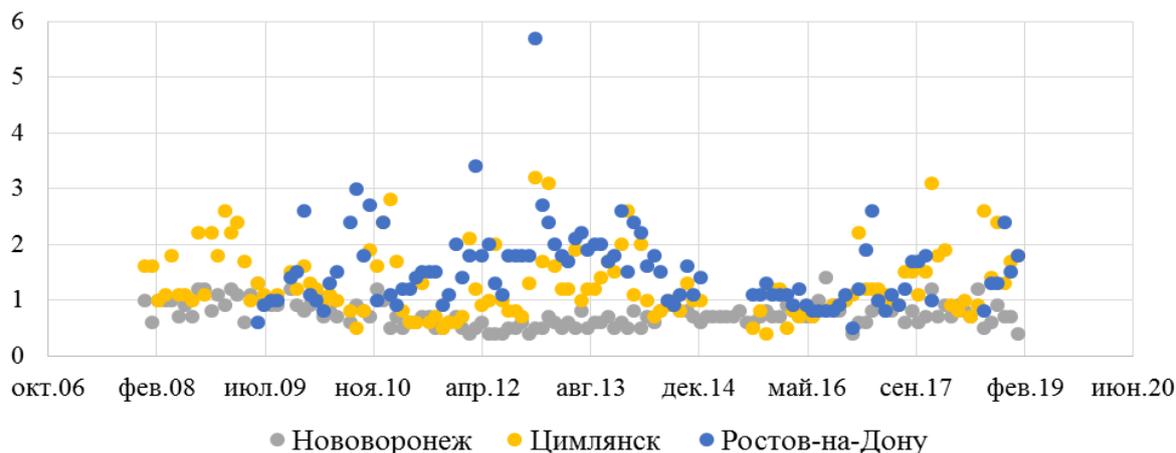


Рисунок 1 – Среднемесячные значения суммарной β -активности атмосферных выпадений, $Bq/(m^2 \cdot \text{сутки})$ [Monthly average values of the total β -activity of atmospheric deposition, $Bq / (m^2 \cdot \text{day})$]

Для реализации консервативного подхода было выполнено сравнение рассматриваемых территорий по максимальным ежемесячным значениям анализируемого параметра (рис. 2).

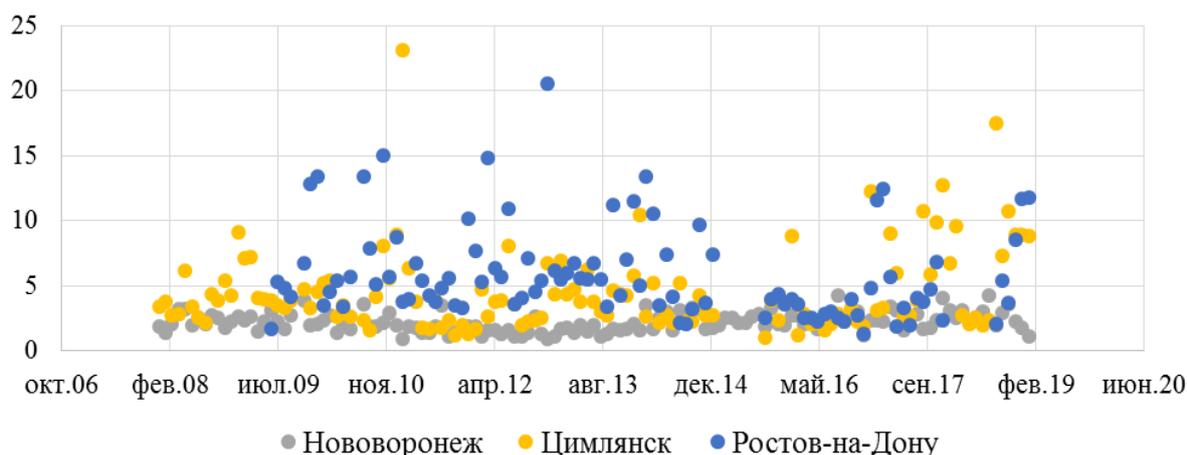


Рисунок 2 – Максимальные ежемесячные значения суммарной β -активности атмосферных выпадений, $Bq/(m^2 \cdot \text{сутки})$ [The maximum monthly values of the total β -activity of atmospheric precipitation, $Bq / (m^2 \cdot \text{day})$]

Значительная колеблемость анализируемых показателей не позволила получить статистически значимые тренды. Поэтому для статистической характеристики совокупности данных были использованы математические ожидания и среднеквадратичные отклонения (табл. 1).

Таблица 1 – Статистические характеристики значений суммарной β -активности атмосферных выпадений [Statistical characteristics of the total β -activity of atmospheric deposition]

Населенный пункт	Многолетнее максимальное значение суммарной β -активности атмосферных выпадений, Бк/(м ² ·сутки)	Многолетнее среднее значение суммарной β -активности атмосферных выпадений, Бк/(м ² ·сутки)	Среднеквадратичное отклонение
Нововоронеж	4,3	0,74	0,22
Цимлянск	23,1	1,30	0,602
Ростов-на-Дону	20,5	1,54	0,712

Данные таблицы свидетельствуют о том, что несмотря на то, что за анализируемый период максимальное значение суммарной β -активности атмосферных выпадений было зафиксировано в г. Цимлянске, многолетнее среднее значение параметра наблюдалось в г. Ростов-на-Дону.

Аналогичный анализ был проведен для объемных значений суммарной β -активности в приземном слое воздуха (рис. 3, 4).

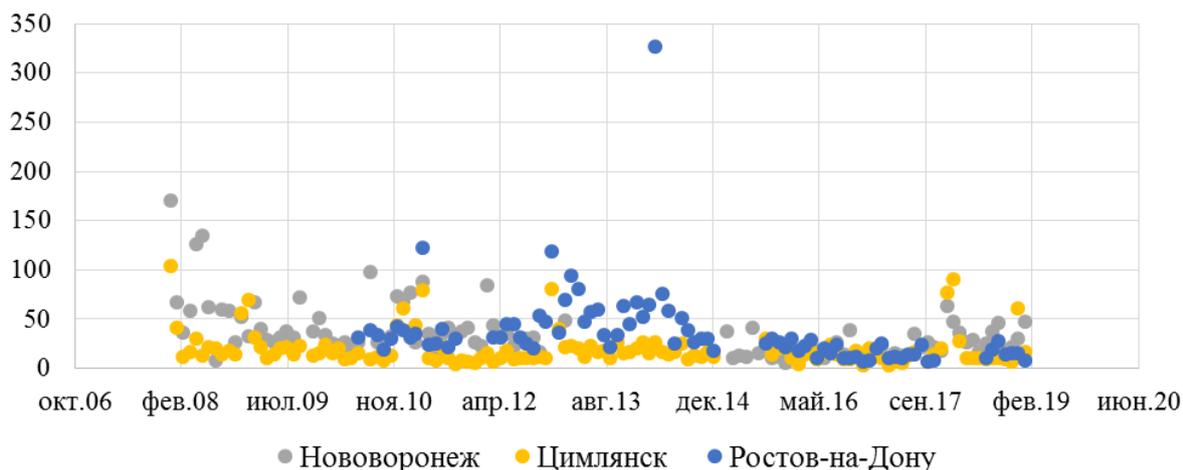


Рисунок 3 – Максимальные ежемесячные значения объемной суммарной β -активности приземного слоя воздуха, 10^{-5} Бк/м³ [The maximum monthly values of the total volume β -activity of the surface air layer, 10^{-5} Bq / m³]

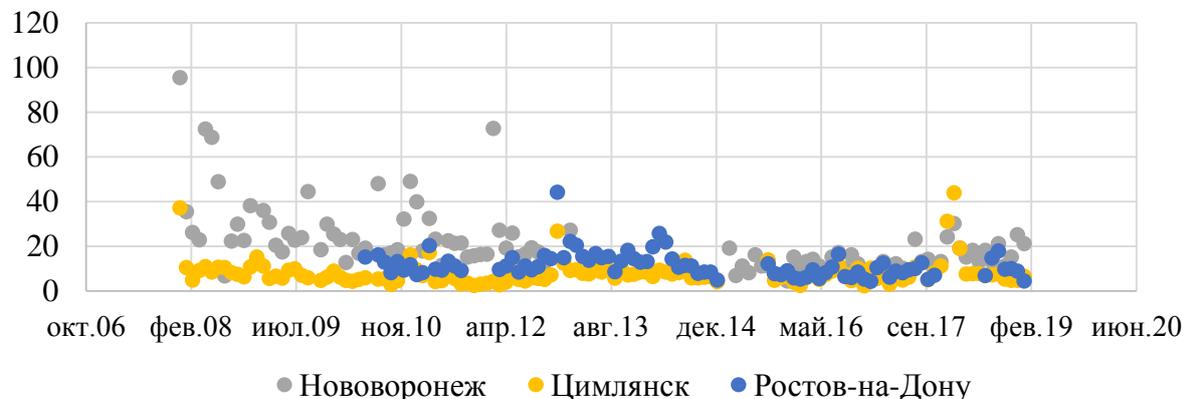


Рисунок 4 – Среднемесячные значения объемной суммарной β - активности приземного слоя воздуха, 10^{-5} Бк/м³ [Monthly mean values of the total volume β - activity of the surface air layer, 10^{-5} Bq / m³]

Сравнение распределения данных на рисунках 1-4 показывает, что значения параметров не зависят от срока эксплуатации энергоблоков и близости к АЭС.

Для статистической характеристики совокупности данных также были использованы математические ожидания и среднеквадратичные отклонения (табл. 2)

Таблица 2 – Статистические характеристики объемной суммарной β - активности приземного слоя воздуха [Statistical characteristics of the total volume β -activity of the surface air layer]

Населенный пункт	Многолетнее максимальное значение		Многолетнее среднее значение		
	$\times 10^{-5}$, Бк/м ³	% от ДОА*	$\times 10^{-5}$, Бк/м ³	Средне-квадратичное отклонение	% от ДОА*
Нововоронеж	171	0,006	21,47	14,81	0,0008
Цимлянск	104	0,004	8,05	5,85	0,0003
Ростов-на-Дону	327	0,012	11,57	5,73	0,0004

*ДОА – допустимая объемная активность

При этом многолетнее максимальное значение анализируемого параметра отмечалось в г. Ростов-на-Дону на уровне сотых долей процента от допустимой объемной активности, составляющей 27 Бк/м³[4], а многолетнее среднее значение – в г. Нововоронеж, но даже оно составляет десятитысячные доли процента от допустимого значения.

Потенциальной угрозой безопасности населения территории размещения атомной станции может выступать накопление радионуклидов, поступающих в окружающую среду в процессе ее эксплуатации. Это может привести к росту содержания радионуклидов в продуктах питания местного производства и повлиять на здоровье населения. В зоне наблюдения Ростовской АЭС (РоАЭС) проживает более 215 тысяч человек, более 80% данной территории используется как земли сельскохозяйственного назначения. Поэтому актуальным является анализ динамики содержания радионуклидов в продуктах, выращенных в зоне наблюдения Ростовской АЭС, преимущественно составляющих рацион местного населения.

При этом использовались результаты производственного контроля зоны наблюдения РоАЭС и данные Роспотребнадзора, представленные в радиационно-гигиенических паспортах территорий Ростовской и Волгоградской областей. При расчетах был использован статистический анализ данных в *MSExcel*.

Выполнен анализ динамики данных по суммарной β -активности десяти продуктов питания местного производства в зоне наблюдения за 2002-2017 гг. [5-9], то есть с начала эксплуатации РоАЭС. Для сравнения использовались аналогичные значения, полученные при исследовании радиационной обстановки в окружающей среде региона Ростовской АЭС в предпусковой период, которые получили название «нулевого фона» [10]. Примеры динамики параметра представлены на рисунке 5.

Приведенные графики свидетельствуют об отсутствии каких-либо значимых изменений, связанных с пуском энергоблоков, в динамике изучаемых показателей.

Так же, как и в предыдущем случае, не удалось получить статистически значимые тренды, что может свидетельствовать об отсутствии явно выраженной тенденции в динамике суммарной β -активности в продуктах питания. Поэтому были определены математические ожидания и среднеквадратичные отклонения рассматриваемых параметров для каждого продукта в сравнении с «нулевым фоном» (табл. 3).

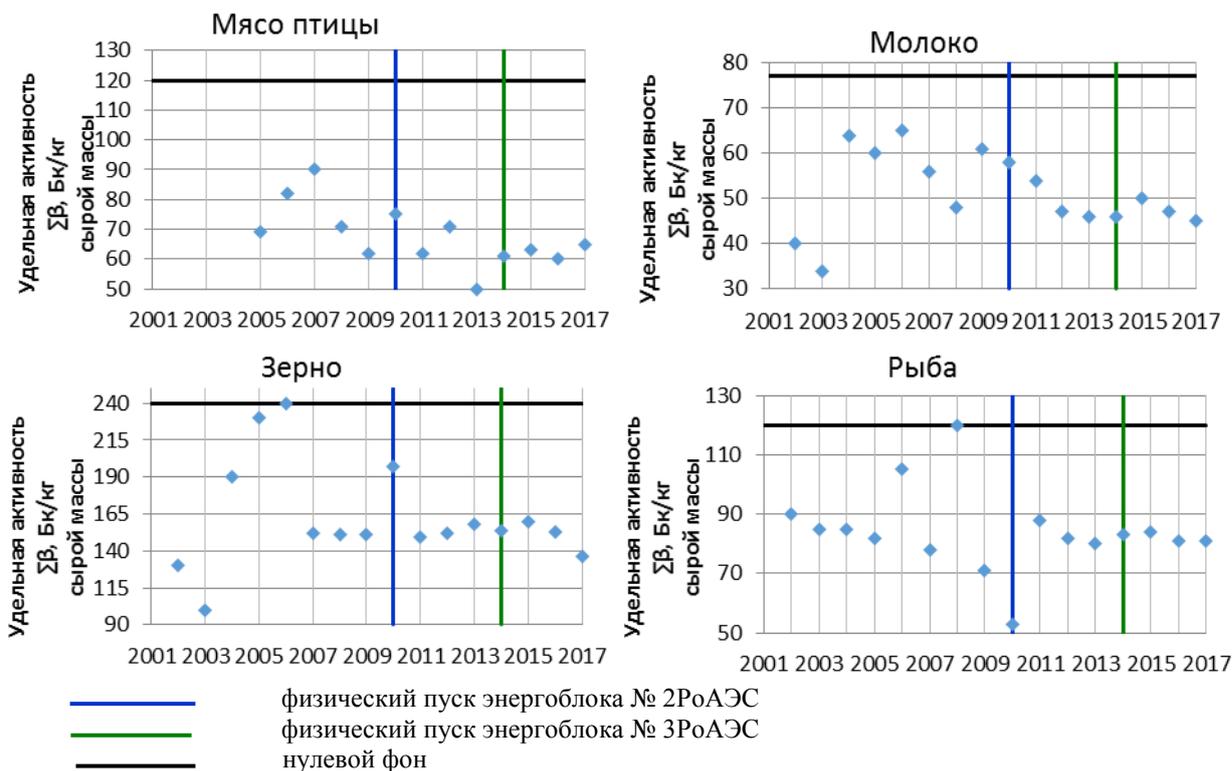


Рисунок 5 – Сравнительный анализ суммарной β -активности в продуктах питания, Бк/кг [Comparative analysis of total β -activity in food, Bq / kg]

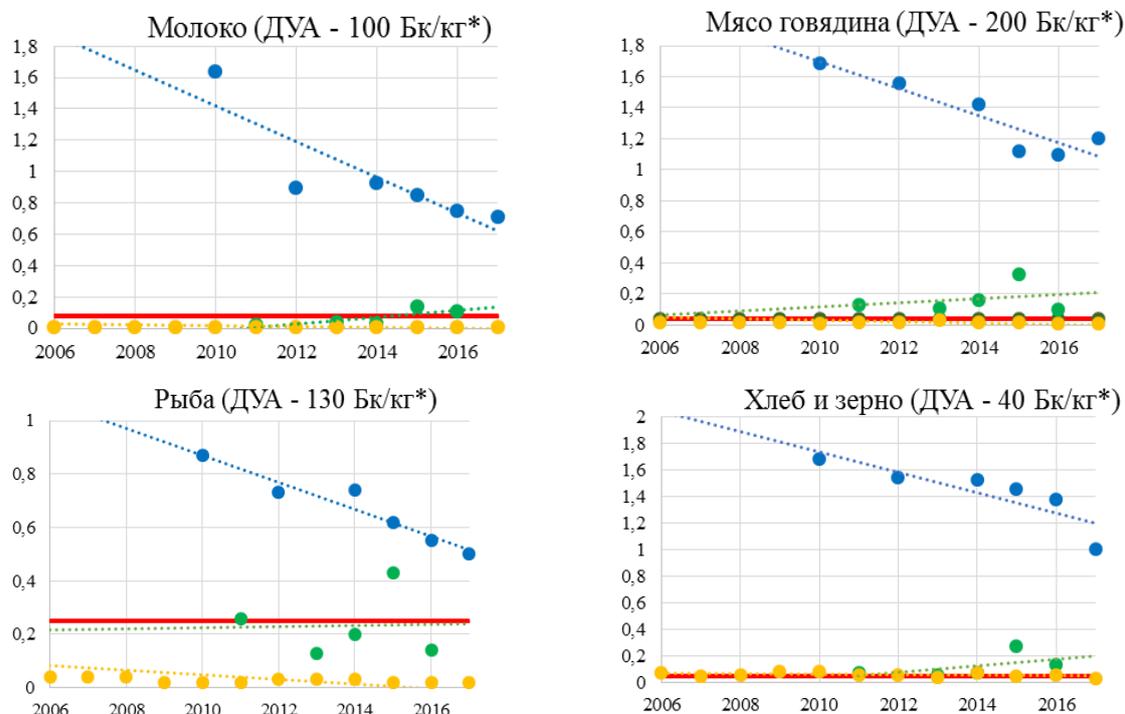
В соответствии с «правилом трех сигм» с вероятностью 0,997 реальные значения показателя могут превышать среднее значение не более чем на три среднеквадратичных отклонения. Для большинства перечисленных продуктов указанная верхняя граница не превосходит соответствующих значений «нулевого фона». Вместе с тем, для таких продуктов как зерно, корнеплоды, ягоды, фрукты верхняя граница превышает «нулевой фон» на 10 и более процентов. Однако даже в этих случаях речь идет не о массовых превышениях, а об отдельных случайных отклонениях, вероятность которых мала.

Таблица 2 – Характеристика суммарной β -активности продуктов питания местного производства в зоне наблюдения, Бк/кг [Characterization of the total β -activity of locally produced food products in the observation zone, Bq / kg]

Продукт	Среднее значение	Среднее квадратичное отклонение	«Нулевой фон»
Зерно	162,69	35,62	240
Корнеплоды	117,44	16,94	128
Овощи	76,50	10,38	108
Рыба	84,25	14,14	120
Мясо (говядина)	87,14	9,92	120
Молоко	51,31	8,81	77
Ягоды	61,27	12,62	65
Мясо (птицы)	66,07	11,82	120
Фрукты	73,93	13,77	95
Яйцо кур.	46,62	7,01	70

К основным техногенным долгоживущим радионуклидам, вносящим свой вклад в уровень суммарной β -активности, относятся изотопы ^{137}Cs и ^{90}Sr . Динамика удельной

активности изотопов ^{137}Cs и ^{90}Sr в продуктах местного производства рассматривалась по зоне наблюдения РоАЭС [9], Ростовской [11] и Волгоградской [12] областей за период 2010-2017 гг. Примеры динамики среднегодовых показателей ^{137}Cs и ^{90}Sr представлены на рис. 6 и 7 соответственно.

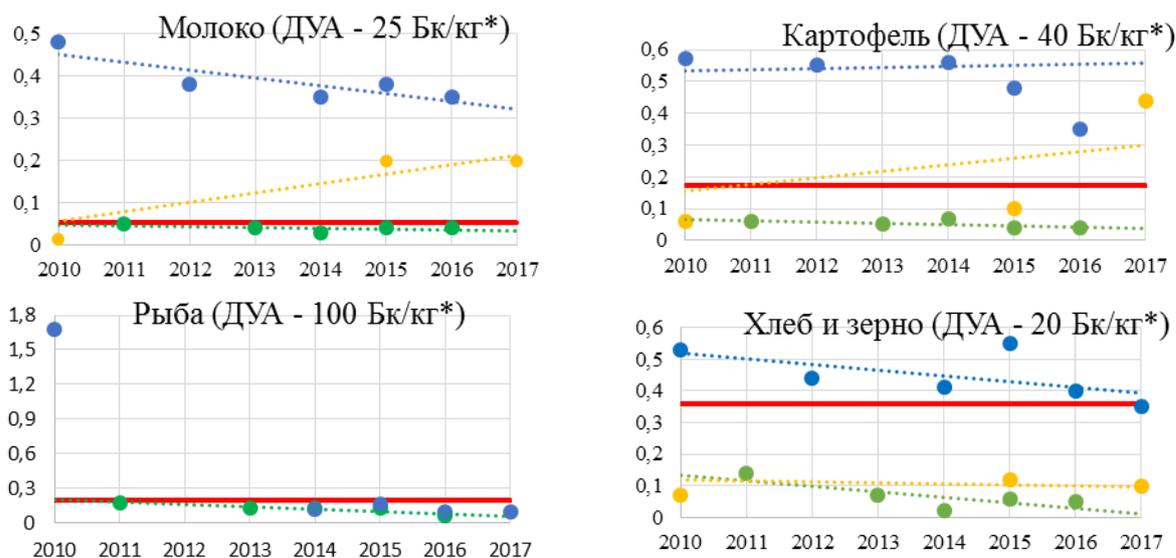


● Ростовская область ● Волгоградская область ● Зона наблюдения

— «нулевой фон» зоны наблюдения [10]

*ДУА – допустимая удельная активность [13]

Рисунок 6 – Динамика среднегодовой удельной активности изотопа ^{137}Cs в продуктах питания, Бк/кг
[Dynamics of the average annual specific activity of the ^{137}Cs isotope in food, Bq / kg]



● Ростовская область ● Волгоградская область ● Зона наблюдения

— «нулевой фон» зоны наблюдения

*ДУА – допустимая удельная активность [13]

Рисунок 7 – Динамика среднегодовой удельной активности изотопа ^{90}Sr в продуктах питания, Бк/кг
[Dynamics of the average annual specific activity of the ^{90}Sr isotope in food, Bq / kg]

Примеры динамики максимальных значений удельной активности изотопов ^{137}Cs и ^{90}Sr по рассматриваемым территориям представлены на рисунке 8.

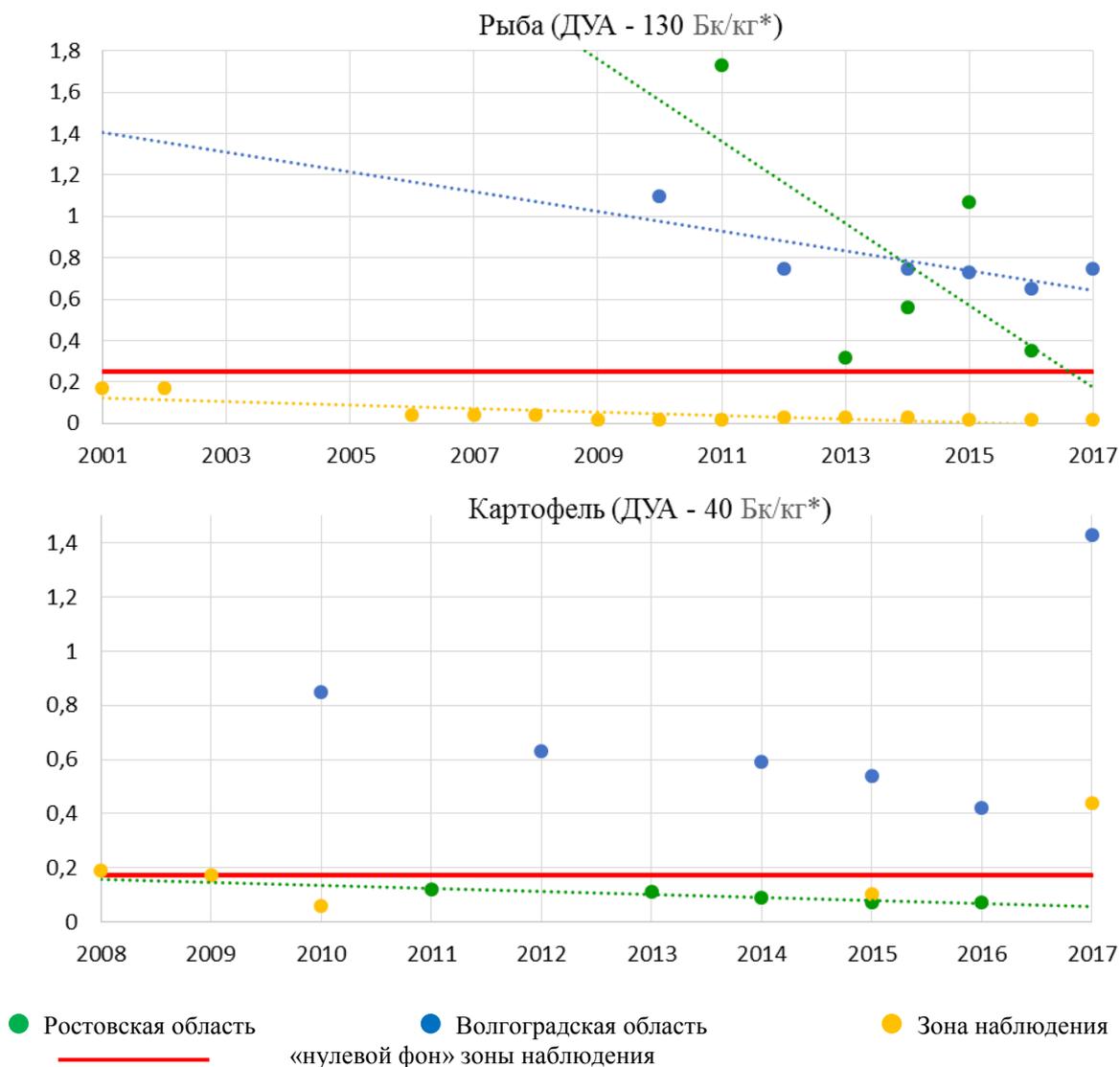


Рисунок 8 – Динамика максимальной удельной активности изотопов ^{137}Cs (Рыба) и ^{90}Sr (картофель), Бк/кг [Dynamics of the maximum specific activity of the isotopes ^{137}Cs (Fish) and ^{90}Sr (potatoes), Bq / kg]

Таким образом, выполненный анализ данных показал, что по рассматриваемым параметрам зона наблюдения Ростовской АЭС, а также Ростовская область в целом, не отличаются повышенным содержанием основных долгоживущих техногенных радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в продуктах местного производства по сравнению с Волгоградской областью. Значения суммарной β -активности продуктов питания, выращенных на территории размещения атомной станции, находятся ниже показателей «нулевого фона».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Единая государственная автоматизированная система мониторинга радиационной обстановки на территории Российской Федерации / Справки, ежегодники по загрязнению ОС. – URL : <https://www.rpatyphoon.ru/products/pollution-media.php> (дата обращения: 22.03.2019).
2. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды / Научно-производственное объединение «Гайфун» // Радиационная обстановка на территории России

- сопредельных государств. – URL : <http://www.rpatyphoon.ru/products/pollution-media.php> (дата обращения: 22.03.2019).
3. Управление федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Ростовской области / Доклады о состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения Ростовской области. – URL : <http://61.rosпотребнадзор.ru/> (дата обращения: 25.06.2019).
 4. СанПиН 2.6.1.2523 – 09 Нормы радиационной безопасности (НРБ – 99/2009) – Москва, 2009 – 87 с. – URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_90936/
 5. Отчет «О радиационной обстановке в районе расположения Ростовской АЭС» за 2002 г. – Волгоград: Ростовская АЭС-2003. – 18 с.
 6. Отчет «О радиационной обстановке в районе расположения Ростовской АЭС» за 2003 г. – Волгоград: Ростовская АЭС-2004. – 22 с.
 7. Отчет «О радиационной обстановке в районе расположения Ростовской АЭС» за 2004 г. – Волгоград: Ростовская АЭС-2005. – 25 с.
 8. Отчет «О радиационной обстановке в районе расположения Ростовской АЭС» за 2005 г. – Волгоград: Ростовская АЭС-2006. – 25 с.
 9. Предварительные материалы оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) эксплуатации энергоблока № 3 в 18-месячном топливном цикле на мощности реакторной установки 104% от номинальной с вентиляторными градирнями. Книга 3. – Волгоград-Валдай: ООО «НПО «Гидротехпроект» – 2018. – 366 с.
 10. Отчет «Радиационная обстановка в окружающей среде региона Ростовской АЭС в предпусковой период («нулевой фон»)». – Волгоград – Ростов-на-Дону, 2000. – 137 с.
 11. Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Ростовской области / Радиационно-гигиенические паспорта территории Ростовской области. – URL : <http://www.61.rosпотребнадзор.ru> (дата обращения: 22.03.2019).
 12. Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Волгоградской области / Радиационно-гигиенические паспорта территории Волгоградской области. – URL : <http://34.rosпотребнадзор.ru> (дата обращения: 22.03.2019).
 13. СанПиН 2.3.2.1078-01 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов». – Москва, 2001 180 с. - URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5214/

REFERENCES

- [1] Edinaya gosudarstvennaya avtomatizirovannaya sistema monitoringa radiacionnoj obstanovki na territorii Rossijskoj Federacii [Unified State Automated System for Monitoring the Radiation Situation in the Russian Federation]. Spravki, ezhegodniki po zagryazneniyu OS [Inquiries, yearbooks on OS pollution]. URL: <https://www.rpatyphoon.ru/products/pollution-media.php> - accessed 22.03.2019 (in Russian).
- [2] Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy. Nauchno-proizvodstvennoye ob'yedineniye «Tayfun» [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring // Scientific and Production Association «Typhoon»]. Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nykh gosudarstv [Radiation Situation on the Territory of Russia and Neighboring States]. URL: <http://www.rpatyphoon.ru/products/pollution-media.php> - accessed 03.22.2019 (in Russian).
- [3] Upravleniye federal'noy sluzhby po nadzoru v sfere zashchity prav potrebitel'ey i blagopoluchiya cheloveka po Rostovskoy oblasti [Office of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-Being in the Rostov Region]. Doklady o sostoyanii sanitarno-epidemiologicheskogo blagopoluchiya naseleniya Rostovskoy oblasti [Reports on the State of the Sanitary-Epidemiological Welfare of the Rostov Region Population]. URL: <http://61.rosпотребнадзор.ru/> - accessed 25.06. 2019 (in Russian).
- [4] SanPiN 2.6.1.2523 – 09 Normy radiatsionnoy bezopasnosti (NRB – 99/2009) [SanPiN 2.6.1.2523 - 09 Radiation Safety Standards (NRB - 99/2009)]. 87 p. (in Russian).
- [5] Otchet «O radiatsionnoy obstanovke v rayone raspolozheniya Rostovskoy AES» za 2002 g. [Report «Radiation Situation in the Area of the Rostov NPP Location» for 2002]. 2003. 18 p. (in Russian).
- [6] Otchet «O radiatsionnoy obstanovke v rayone raspolozheniya Rostovskoy AES» za 2003 g. [Report «Radiation Situation in the Area of the Rostov NPP Location» for 2003]. 2004. 22 p. (in Russian).
- [7] Otchet «O radiatsionnoy obstanovke v rayone raspolozheniya Rostovskoy AES» za 2004 g. [Report «Radiation Situation in the Area of the Rostov NPP Location» for 2004]. 2005. 25 p. (in Russian).
- [8] Otchet «O radiatsionnoy obstanovke v rayone raspolozheniya Rostovskoy AES» za 2005 g. [Report «Radiation Situation in the area of the Rostov NPP Location» for 2005]. 2006. 25 p. (in Russian).

- [9] Predvaritel'nyye materialy otsenki vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu (OVOS) ekspluatatsii energobloka № 3 v 18-mesyachnom toplivnom tsikle na moshchnosti reaktornoy ustanovki 104% ot nominal'noy s ventilyatornymi gradirnyami. Kniga 3 [Preliminary Materials of the Environmental Impact Assessment (EIA) of the Operation of Power Unit No. 3 in the 18-month Fuel Cycle at a Reactor Plant Capacity of 104% of the Nominal with Cooling Towers. Book 3]. OOO «NPO«Gidrotekhproyekt» [Gidrotekhproekt LLC NPO]. 2018. 366 p. (in Russian).
- [10] Otchet «Radiatsionnaya obstanovka v okruzhayushchey srede regiona Rostovskoy AES v predpuskovoy period («nulevoy fon»)» [Report «Radiation Situation of the Environment in the Area of the Rostov NPP Location during the Pre-Launch Period («Zero Background»)»]. 2000. 137 p. (in Russian).
- [11] Federal'naya sluzhba po nadzoru v sfere zashchity prav potrebiteley i blagopoluchiya cheloveka po Rostovskoy oblasti [Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-Being in the Rostov Region]. Radiatsionno-gigiyenicheskiye pasporta territorii Rostovskoy oblasti [Radiation-hygienic passports of the territory of the Rostov region]. URL: <http://www.61.rospotrebnadzor.ru> - accessed 22.03. 2019 (in Russian).
- [12] Federal'naya sluzhba po nadzoru v sfere zashchity prav potrebiteley i blagopoluchiya cheloveka po Volgogradskoy oblasti [Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-Being in the Volgograd Region]. Radiatsionno-gigiyenicheskiye pasporta territorii Volgogradskoy oblasti [Radiation-Hygienic Passports of the Volgograd Region Territory]. URL: <http://34.rospotrebnadzor.ru> - accessed 22.03. 2019 (in Russian).
- [13] SanPiN 2.3.2.1078-01 «Gigiyenicheskiye trebovaniya bezopasnosti i pishchevoy tsennosti pishchevykh produktov» [SanPiN 2.3.2.1078-01 «Hygienic Requirements for Safety and Nutritional Value of Food»]. 180 p. (in Russian).

The Radiation Factors Dynamics Analysis of the Rostov NPP Location Area

I.A. Bublikova¹, O.F. Tsuverkalova²

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

¹ORCID iD: 0000-0002-4857-5271

Publons: Irina Bublikova

e-mail: IABublikova@mephi.ru

²ORCID iD: 0000-0001-6304-4498

WoS Researcher ID: J-8183-2016

e-mail: ofttsuverkalova@mephi.ru

Abstract – The relevance of the work is determined by the fears of the population about increasing radioactive parameters of the environment in the area where the Rostov NPP is located. The methods of regression analysis are used to study the dynamics of the average and maximum values of the total β -activity of the near-surface air layer and atmospheric deposition obtained during state radiation monitoring. It is shown that the operation of power unit No. 1 for 17 years and the commissioning of new units did not lead to an increase in the analyzed parameters. The analysis of data on locally produced food products showed that the observation area of the Rostov NPP, as well as the Rostov region as a whole, does not have higher content of the main long-lived technogenic radionuclides ^{137}Cs and ^{90}Sr in comparison with the Volgograd region. The values of the total β -activity of food products grown on the territory of the nuclear power plant are below the «zero background» indicators.

Keywords: Rostov NPP; Tsimlyansk, Rostov-on-Don, total β -activity; atmospheric precipitation; surface layer of the atmosphere; locally produced food products, technogenic radionuclides, radiation monitoring, surveillance zone, Rostov Region, Volgograd Region.

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 623.45:629.78:662.22

**ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ
УДАРНИКОВ НА ВЗРЫВООПАСНЫЙ ОБЪЕКТ С
МАЛОГАБАРИТНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
УСТАНОВКОЙ**

© 2019 О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе

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

Сохранение сплошности элементов корпуса ракетного твердотопливного двигателя (РДТТ) и элементов конструкции промежуточных отсеков, метаемых продуктами детонации, маловероятно. Рассматривается поражающее воздействие элементов конструкции РДТТ, метаемых продуктами детонации зарядов различной формы. Проведена оценка величины давления во фронте ударной волны, возникающей в наружном слое установки при ударе осколков оболочки заряда.

Ключевые слова: твердое ракетное топливо, ударно-волновое инициирование, детонация, ядерный боеприпас, аварийный взрыв.

Поступила в редакцию 26.10.2018

После доработки 10.06.2019

Принята к публикации 21.06.2019

На настоящий момент существуют страны, не являющиеся членами так называемого «Ядерного клуба», которые создали свой ядерный потенциал или находятся на пороге его создания (Израиль, Индия, Пакистан, Южная Корея, КНДР, Иран и другие). Более двадцати стран обладают ракетным оружием способным нести ядерные заряды [1]. Значительная доля мобильных пусковых установок наземного базирования этих стран оснащена баллистическими ракетами (рис. 1) с твердотопливными ракетными двигателями (РДТТ).

Международная обстановка в XXI веке была и будет сопряжена с вооруженными конфликтами различного характера. Например, Индия и Пакистан последовательно наращивают ядерный потенциал и развивают средства доставки ядерного оружия (ЯО). Опыт последнего вооруженного конфликта (2019 г.) свидетельствует о низком пороге перехода от приграничных столкновений к полномасштабным боевым действиям [2]. В настоящий момент, по оценкам различных экспертных центров, в арсенале Индии от 90 до 120 единиц ЯО, у Пакистана – от 35 до 70 и все это воспринимается как средство решения военных задач, которые войска не в состоянии выполнить с обычными средствами поражения, а также для захвата стратегической инициативы и устрашения [3]. Вероятность войны на Корейском полуострове сегодня также выше, чем за последние 60 лет [4]. Ситуация требует решения, причем политического и дипломатического. Конечно, американский превентивный ядерный удар по КНДР маловероятен, поскольку в Вашингтоне осознают риск спровоцировать ядерный конфликт, но при определенных условиях следует ожидать поражение пусковых установок и ракет обычными средствами стратегической и тактической авиации, а также крылатыми ракетами морского базирования в рамках проводимой операции на

театре военных действий [5]. Возможно поражение или нарушение функционирования подобных ракетных комплексов диверсионно-разведывательными формированиями [6].

Остро стоит проблема технической надежности ракетных комплексов с ядерными боеприпасами (ЯБП), находящихся в боевом составе армий выше перечисленных государств. Также в современных условиях следует ожидать дальнейшего снижения качества выполнения личным составом, эксплуатирующим ЯО и носители с ним, требований по обеспечению ядерной безопасности и предотвращению несанкционированных действий. В разгар «холодной войны» в 1985 г. на территории ФРГ (база США) произошел взрыв твердотопливного двигателя ракеты «Першинг-2» без боевого оснащения, но рядом находились подобные ракеты с ядерными боеголовками [6, 7].

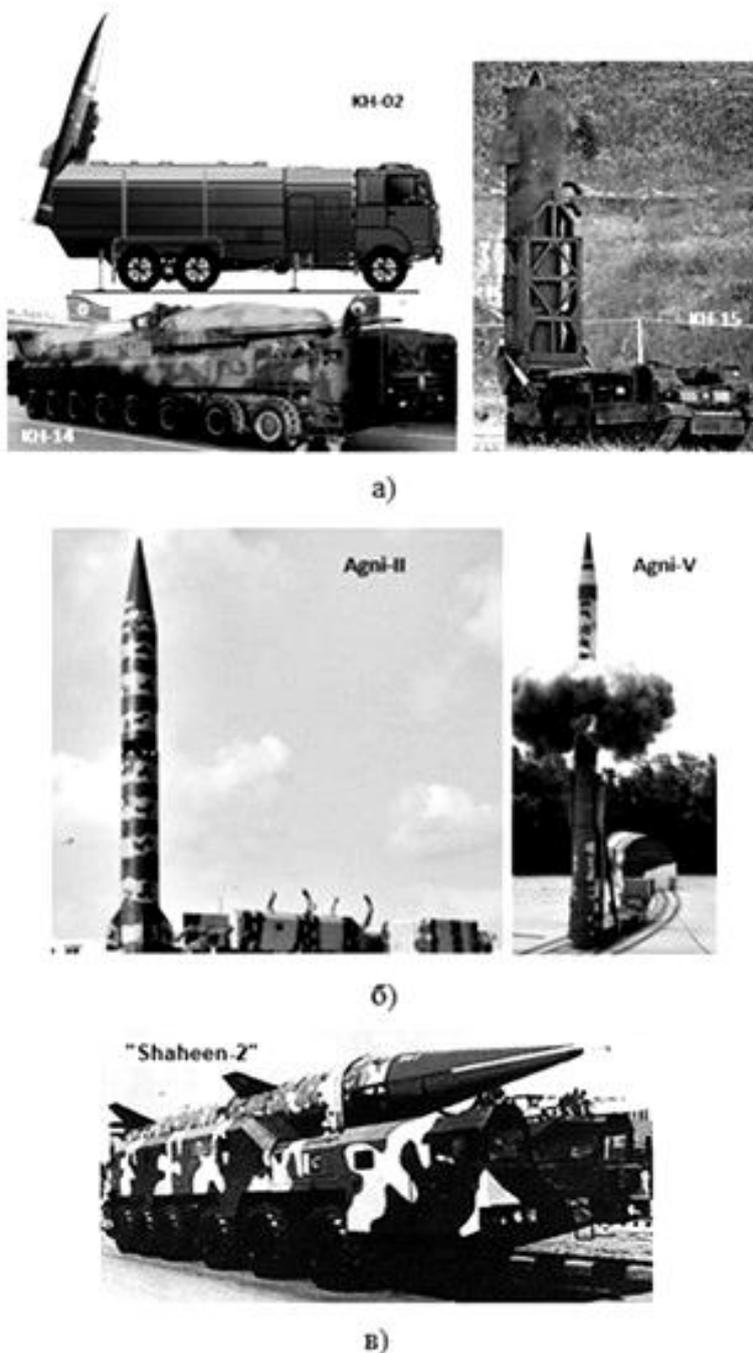


Рисунок 1 – Баллистические ракеты наземного базирования: а – КНДР; б – Индия; в – Пакистан
 [Ground-based ballistic missiles: a – DPR Korea; b – India; c – Pakistan]

В итоге следует провести моделирование возможных исходов при нерегламентированных деструктивных воздействиях для данной аварийной ситуации.

Оценка последствий для боевого оснащения ракеты воздействия кинетических ударников по заряду твердого ракетного топлива (ТРТ) может быть сведена к оценке технического состояния (ТС) ЯБП путем вычисления вероятности P_j нахождения системы в том или ином состоянии с помощью метода логико-метрического распознавания. В качестве критериев оценки ТС следует использовать критерии надежности или критерии работоспособности ЯБП. Логический этап обеспечивает исключение из классов состояния, признаки которых логически отрицаются, а метрический этап позволит рассчитать вероятность принадлежности системы к определенному классу состояния.

Анализ возможных аварийных ситуаций с твердотопливными двигательными установками ракет показал, что наиболее опасным для ЯБП, является ударное воздействие, создаваемое действием продуктов детонации и разгоняемыми элементами конструкции [5]. Рассмотрим поражающее воздействие таких элементов.

В момент воздействия ударника (осколок, пуля) по заряду ТРТ в нем (топливе) распространяется ударная волна (УВ). ТРТ за фронтом УВ находится в сжатом состоянии. Диаметр зоны сжатия определяется диаметром поверхности контакта ударника с ТРТ, глубина – толщиной осколка, интенсивность сжатия – скоростью ударника, его материалом и свойствами топлива. В сжатом топливе возникают очаги химической реакции – «горячие точки». В зависимости от интенсивности и продолжительности сжатия ТРТ возбуждаются: детонация; взрывное горение; послойное горение; разрушение заряда. Необходимая для возбуждения взрывчатого превращения интенсивность сжатия зависит от общего числа «горячих точек», а, следовательно, от структуры ТРТ и размеров зоны сжатия. В таблице 1 приведены результаты расчета параметров инициирующей УВ для одного из предложенных в статье [5] образцов гипотетического ТРТ, диапазон механических, теплофизических и химических свойств которого был определен по материалам работ [9-14]. В качестве ударника принят цилиндрический осколок из АМг-6.

Таблица 1 – Результаты расчета [Results of calculation]

Вид превращения *	d_0 , мм	u_0 , м/с	P , МН/м ²	u м/с
детонация	20	630	1370	593
	30	490	906	462
горение	20	580	1195	550
	30	430	705	406

*Здесь d_0 – диаметр ударника (осколка); u_0 – критическая скорость удара;
 P – давление во фронте УВ; u – скорость УВ

Анализ результатов показал, что с уменьшением диаметра осколка параметры УВ увеличиваются.

В реальных условиях сохранение сплошности элементов корпуса РДТТ и элементов конструкции промежуточных отсеков, метаемых продуктами детонации заряда ТРТ, маловероятно [5], в связи, с чем необходимо оценить диапазон возможных скоростей осколков (фрагментов). В работе [15] предложена математическая модель детонации заряда в корпусе, позволяющая определять скорость метания конструкции. Предварительные расчеты показали, что ожидаемые значения скоростей осколков находятся в диапазоне 950÷5600 м/с, а масса осколков составит от 0,2 до 10 кг.

Рассмотрим три варианта форм оболочек с зарядом: пластина в трубе; цилиндр; сфера (рис. 2). Выделим элементарный слой, радиус которого равен R (для пластины в

трубе – расстояние от точки инициирования до элементарного слоя), а толщина – dR . Пусть в какой-то момент времени детонация закончилась (мгновенная детонация) и начался процесс расширения продуктов взрыва. Метаемым элементам, образовавшимся при дроблении оболочки, сообщается начальная скорость v_0 . Примем допущение, что скорость расширения продуктов взрыва (ПВ), прилегающих до этого к оболочке изнутри, будет равна $v_{нс} = v_0$. Для внутренних слоев эта скорость уменьшается к центру или оси симметрии заряда до нуля.

В момент разрушения оболочки внутри расширяющихся продуктов взрыва устанавливается распределение скорости, подчиненное закону

$$v_{III} = v_0 \left(\frac{R}{R_0} \right)^n, \quad (1)$$

где $n = 1$ при линейном распределении скорости; $n = 2$ при параболическом; R_0 – радиус исходного заряда (для плоской симметрии – протяженность слоя заряда).

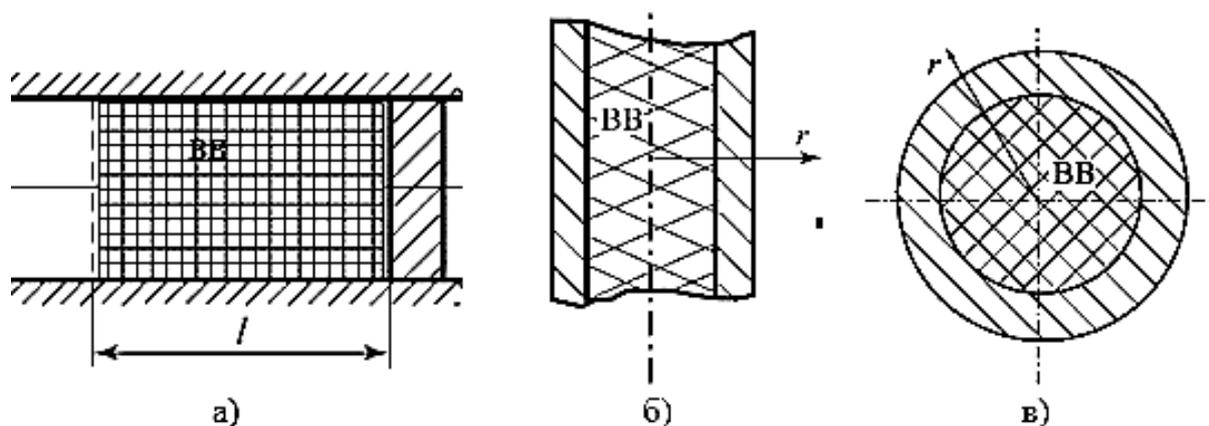


Рисунок 2 – Формы оболочек с зарядом: а – пластина в трубе; б – цилиндр; в – сфера
[Shell shapes with charge: a – plate in the pipe; b – cylinder; c – sphere]

В цилиндрическом заряде определим кинетическую энергию $dE_{нс}$ расширяющихся продуктов взрыва, заключенных в элементарном слое толщиной dR , на расстоянии R (торцевым разлетом продуктов детонации пренебрегаем)

$$dE_{нс} = \frac{v_{нс}^2 dm_{нс}}{2}, \quad (2)$$

где $dm_{нс}$ – масса продуктов взрыва, заключенная в рассматриваемом элементарном слое.

Для различных форм оболочки заряда (пластина в трубе, цилиндр, сфера):

$$\begin{aligned} dm_{нс} &= \rho_{нс} dR; \\ dm_{нс} &= 2\pi R \rho_{нс} dR; \\ dm_{нс} &= 4\pi R^2 \rho_{нс} dR, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\rho_{нс}$ – плотность продуктов взрыва.

Для цилиндрического заряда единичной длины с учетом (1) и (3), принимая $\rho_{ne} = \rho_{ee}$

$$dE_{ПВ} = \frac{\pi \rho_{BB} v_0^2 R^{2n+1}}{R_0^{2n}}. \quad (4)$$

Интегрируя выражение (4) и проведя преобразования, получим

$$E_{ПВ} = \frac{m_{BB}^* v_0^2}{2}, \quad (5)$$

где $m_{ee}^* = m_{ee}/(n+1)$ – масса части продуктов детонации, ускоряющих оболочку заряда; $m_{ee} = \pi R_0^2 \rho_{ee}$.

Аналогично для плоской симметрии:

$$\begin{aligned} m_{BB}^* &= m_{BB} / (n+1); \\ m_{BB} &= R_0 \rho_{BB}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для сферы:

$$\begin{aligned} m_{BB}^* &= 3m_{BB} / (n+3); \\ m_{BB} &= \frac{4\pi R_0 \rho_{BB}}{dR}. \end{aligned} \quad (7)$$

Пренебрегая потерей энергии на дробление и деформацию оболочки заряда, запишем закон движения оболочки и продуктов взрыва

$$P_{ПВ} S_{ПВ} = \frac{(n_{об} + m_{BB}^*) v dv}{dR}, \quad (8)$$

где P_{ne} и S_{ne} – давление продуктов взрыва, ускоряющих оболочку, и площадь контакта оболочки с продуктами взрыва.

При мгновенной детонации

$$P_{ПВ} = \frac{\rho_{BB} D^2 / 2 (n+1)}{(R_0 / R)^{N \cdot k}}, \quad (9)$$

где k – показатель изоэнтропы продуктов детонации; D – скорость детонации; $N = 1, 2, 3$ для пластины, цилиндра и сферы соответственно.

Введем безразмерные переменные:

$$r = R / R_0; \quad \beta = m_{BB} / m_{об}; \quad U = v / D; \quad (10)$$

$$f = \frac{\rho_{BB} R_0}{2m_{BB} (n+1)}; \quad S^* = S / S_0$$

Здесь S_0 – начальная площадь контакта оболочки и продуктов взрыва.
Подставляя (9) в (8) с учетом (10), получим

$$U \frac{dU}{dr} = \frac{\beta}{1 + n_1 \beta} f\left(\frac{1}{r^{N-k}}\right) S^* \quad (11)$$

где n_1 принимает значения: $1/(2n + 1)$ – пластина; $1/(n + 1)$ – цилиндр; $3/(2n + 3)$ – сфера.

Интегрирование уравнения (11) дает общее выражение для определения начальной скорости элементов оболочки

$$v_0 = \mu \cdot D \sqrt{\beta + n_1 \beta} \quad (12)$$

где μ – параметр заряда, зависящий от типа дробления оболочки, показателя изоэнтропы и формы заряда.

Если оболочка тонкая, то значение начальной скорости стремится к предельному. Предельное значение скорости осколков зависит от формы заряда и характера организации дробления его оболочки. При неорганизованном дроблении

$$v_{пред} = D \sqrt{8n_1} \quad (13)$$

Расчеты показали, что начальное значение давления во фронте ударной волны, возникающей в наружном слое оболочки ЯБП при ударе фрагментов конструкции РДТТ превышает 20 ГПа. Ожидаемый исход развития данного воздействия – аварийный неактивный взрыв (разрушение ЯБП) с возможным развитием пожара.

На основании приведенных результатов расчетов следует разработать комплекс мероприятий, выполняемых в случае неблагоприятных исходов для нашей территории при возникновении подобных инцидентов у границ РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слипченко, В. И. Войны нового поколения: дистанционные бесконтактные / В. И. Слипченко. – Москва : ОЛМА-ПРЕСС Образование, 2004. – 382 с.
2. Зайцев, М. С. Сравнительный анализ военных доктрин Индии и Пакистана / М. С. Зайцев // Сравнительная политика. – 2018. – № 3. – С. 14-25.
3. 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>.
4. Hans M. Kristensen, Robert S. Norris (2018) North Korean nuclear capabilities. Bulletin of the Atomic Scientists. 2018. VOL.74. № 1. P. 41-51. URL : <https://www.tandfonline.com/loi/rbul20>
5. 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.
6. Денисов, О. В. Комплексная безопасность населения и территорий в чрезвычайных ситуациях. Проблемы и решения: монография / О. В. Денисов, О. А. Губеладзе, Б. Ч. Месхи, Ю. И. Булыгин; под общей редакцией Ю. И. Булыгина. – Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2016. – 278 с.
7. Кириллов, В. М. Физические основы радиационной и ядерной безопасности / В. М. Кириллов. – Москва : РВСН, 1992. – 212 с.
8. Михайлов, В. Н. Безопасность ядерного оружия России / под ред. В.Н. Михайлова – Москва : Мин. по атомной энергии – 1998. – 148 с.
9. 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.
10. Косточко, А. В. Пороха, ракетные твердые топлива и их свойства / А. В. Косточко, Б. М. Кабзан. – Москва : ИНФРА-М, 2014. – 399 с.
 11. Соколовский, М. И. Опыт экологически чистой утилизации малогабаритных РДТТ / М. И. Соколовский, В. З. Каримов, Ю. Н. Щербаков // 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. 2-4.
 12. Алемасов, В. Е. Теория ракетных двигателей: учебник для студентов ВТУЗов [Текст] / В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегалин, А. П. Тишин; под редакцией В. П. Глушко. – Москва : Машиностроение, 1989. – 464 с.
 13. 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.
 14. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь / под редакцией Б. П. Жукова. – Москва : Янус К, 2000. – 483 с.
 15. Губеладзе, О. А. Оценка результатов нерегламентированных воздействий на взрывоопасный объект / О. А. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2011. – № 1. – С. 61-63.
 16. Орленко, Л. П. Физика взрыва и удара / Л. П. Орленко – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 304 с.

REFERENCES

- [1] Slipchenko V.I. Voyny novogo pokoleniya: distantsionnye beskontaktnye [Wars of New Generation: Remote Contactless]. Moscow. OLMA-PRESS Obrazovanie [OLMA-PRESS Education Publishing House]. 2004. 382 p. (in Russian).
- [2] Zaytsev, Mikhail S. Sravnitel'nyi analiz voennykh doktrin Indii i Pakistana [Comparative Analysis of Military Doctrines of India and Pakistan] Sravnitel'naja politika [Comparative Politics] 2018. № 3. P. 14-25 (in Russian).
- [3] 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> (in English).
- [4] Hans M. Kristensen, Robert S. Norris (2018) North Korean nuclear capabilities. Bulletin of the Atomic Scientists. 2018. VOL.74. № 1. P. 41-51. URL: <https://www.tandfonline.com/loi/rbul20> (in English).
- [5] Gubeladze O.A. Express-otsenka rezul'tatov nereglamentirovannykh destruktivnykh vozdeystviy na yaderno- i radiatsionnoopasnyy 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).
- [6] Kirillov V.M. Fizicheskie osnovy radiatsionnoy i yadernoy bezopasnosti [Physical Bases of Radiation and Nuclear Safety]. Moscow. RVSN. 1992. 212 p. (in Russian).
- [7] Denisov O.V., Gubeladze O.A., Meskhi B.Ch., Bulygin Yu.I. Kompleksnaya bezopasnost' naseleniya i territorij v chrezvychajnyx situatsiyax. Problemy i resheniya: monografiya [Complex Safety of the Population and Territories in Emergency Situations. Problems and Solutions.]. Rostov-on-Don. Publishing center Don State Technical University. 2016. 278 p. (in Russian).
- [8] Mikhaylov V.N. Bezopasnost' yadernogo oruzhiya Rossii [Safety of Nuclear Weapon of Russia]. Moscow. Min. po atomnoy energii [Ministry of Nuclear Energy]. 1998. 148 p. (in Russian).
- [9] 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 i resheniya: sb. trudov nauchno-prakticheskoy konferentsii [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. Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. Federal research and production center «Altai». 2003. P. 5-10 (in Russian).
- [10] Kostochko A.V., Kabzan B.M. Porokha, raketnye tverdye topliva i ikh svoystva [Gunpowder, Rocket Solid Fuels and their Properties]. Moscow. INFRA-M. 2014. 399 p. (in Russian).
- [11] Sokolovskiy M.I., Karimov V.Z., Shcherbakov Yu.N. Opyt ekologicheski chistoy utilizatsii malogabaritnykh RDTT [Experience of Environmentally Friendly Utilization of Small-Sized RDTT]. Problemy i resheniya: sb. trudov nauchno-prakticheskoy konferentsii [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. Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. Federal research and production center «Altai». 2003. P. 5-10 (in Russian).

- 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. Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. Federal research and production center «Altai». 2003. P. 2-4 (in Russian).
- [12] Alemasov V.E., Dregalin A.F., Tishin A.P. Teoriya raketnykh dvigateley [Theory of Rocket Engines]. Moskva. Mashinostroenie [Moscow. Mechanical Engineering]. 1989. 464 p. (in Russian).
- [13] Tsutsuran V.I., Petrukhin N.V., Gusev S.A. Voенно-tekhnicheskiy analiz sostoyaniya i perspektivy razvitiya raketnykh topliv [Military and Technical Analysis of a State and Prospect of Development of Rocket Fuels]. Moscow. MO RF. 1999. 332 p. (in Russian).
- [14] Energeticheskie kondensirovannye sistemy. Kratkiy entsiklopedicheskiy slovar' [The Power Condensed Systems. Short Encyclopedic Dictionary]. Moscow. Yanus K. 2000. 483 p. (in Russian).
- [15] Gubeladze O.A. Otsenka rezul'tatov nereglamentirovannykh vozdeystviy na vzryvoopasnyy ob'ekt [Estimating of Unregulated Influence Results on Explosive Object]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2011. №1 (1). P. 61-63 (in Russian).
- [16] Orlenko L.P. Fizika vzryva i udara [Physics of Explosion and Blow]. Moscow. FIZMATLIT [Moscow. PHIZMATLIT]. 2008. 304 p. (in Russian).

Assessment of the Influence Consequence of Kinetic Impactors at Explosive Object with Small-Scale Nuclear Power Facility

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-6921-201

e-mail: buba26021966@yandex.ru

²*ORCID iD: 0000-0002-6966-6391*

WoS Researcher ID: F-7215-2017

e-mail: buba26021966@yandex.ru

Abstract – The continuity preservation of the rocket solid-propellant engine body elements and the intermediate compartments construction units thrown by detonation products is unlikely. The paper considers damaging effect of the construction units of the rocket solid-propellant engine, thrown by the detonation products of different form fillers. The pressure in the shock-wave front arising in the outer plant layer upon impact by filler shell fragments is estimated.

Keywords: solid rocket fuel, shock and wave initiation, detonation, nuclear ammunition, emergency explosion.

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

УДК 528.48

**ПРОБЛЕМЫ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ
КРАНА РАДИАЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИИ
ПРИ МОНТАЖЕ ОСНОВНЫХ ТЯЖЕЛОВЕСТНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ НА СТРОЯЩЕЙСЯ АЭС**

© 2019 Ю.И. Пимшин *, А.С. Демиденко *, И.Ю. Пимшин **

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

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

В статье рассмотрены вопросы испытания крана и подъем корпуса реактора. Данные технологические процедуры связаны с влиянием крана на оболочку. Следствием этого влияния является частичное разрушение стены оболочки, что выражается формированием трещин с внешней стороны оболочки. Сделано предложение о необходимости организации мониторинга как на стадии строительства, так и на стадии эксплуатации оболочки. Это повышает безопасность АЭС.

Ключевые слова: атомная электрическая станция, кран кругового действия, защитная герметичная оболочка, деформации, трещины.

Поступила в редакцию 21.06.2019

После доработки 01.07.2019

Принята к публикации 05.07.2019

Одной из основных технологических машин установленной в гермообъеме атомной станции является кран кругового действия. Кран предназначен: на стадии строительства, для выполнения основных грузоподъемных и транспортных операций в гермообъеме, в частности, подъем и транспортирование на монтажное место оборудования первого контура (корпуса реактора, парогенераторов, циркуляционных насосов, трубопроводов), машины перегрузки топлива и иных грузов; на стадии эксплуатации, транспортирование свежего топлива с площадки железнодорожного спецвагона, через транспортный коридор, в гнездо свежего топлива бассейна выдержки и отработанного – из бассейна, через транспортный коридор, на площадку спецвагона. Кроме этого кран обеспечивает обслуживание всех механомонтажных операций в период текущих ППР.

При этом основной особенностью крана рассматриваемого типа является его движение по окружности. Подкрановой конструкцией является, кольцевой подкрановый рельс, опирающийся на подкрановые балки, которые установлены в герметичном объеме на консолях стены защитной герметичной оболочки [1-12].

Основными жизненными этапами крана кругового действия на атомной станции являются: контрольная сборка металлоконструкций крана на монтажной площадке; монтаж крана на рельсовом пути; наладка крана; динамические и статические испытания крана; сдача крана заказчику. Все этапы по-своему ответственны, они обязаны быть реализованы с соблюдением требований, предъявляемых к ним

нормативной документацией, в том числе и правилами устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов для объектов использования атомной энергии. В настоящей работе рассмотрим реализацию этапа динамических и статических испытаний, требования к которым изложены в пунктах 62-63 этих правил (НП-043-11): «...62. При испытаниях вновь изготовленных кранов на эксплуатационные условия (включая грузовые испытания при полных технических освидетельствованиях) масса контрольного груза должна превышать указанную в паспорте грузоподъемность крана при статических испытаниях на 25%, при динамических испытаниях – на 10%. Для кранов, установленных в помещениях, в которые невозможно доставлять контрольные грузы для проведения испытаний, допускаются контрольные статические испытания с помощью специальных нагрузочных приспособлений. 63. Для проведения испытаний крана с помощью специальных нагрузочных приспособлений организацией – владельцем крана должна быть разработана дополнительная инструкция с учетом требований заводской или конструкторской документации. При использовании специальных нагрузочных приспособлений динамические испытания крана не проводятся...» [3].

Для статических испытаний, крана кругового действия, используют гидравлическое устройство, называемое «Гидронагружатель» (рис. 1). При этом исходя из условий, изложенных в НП, для крана кругового действия, динамические испытания не выполняются. Однако полностью не реализовывать данную операцию невозможно, поэтому, реализуется процедура обкатки крана с грузом, что частично заменяет динамические испытания крана. Для обкатки используют груз весом примерно 180 тонн, что составляет около 50% грузоподъемности крана.

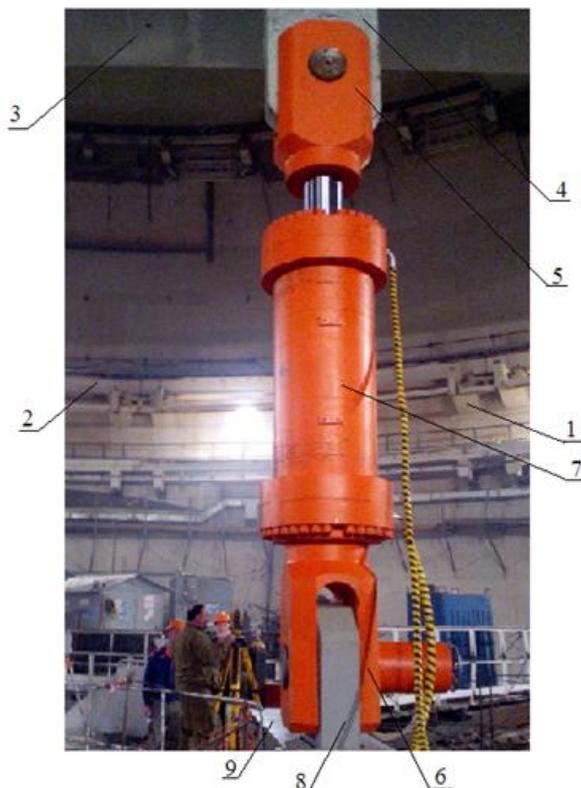


Рисунок 1 – Гидронагружатель: 1 – консоли защитной герметичной оболочки; 2 – подкрановые балки; 3 – пролетная балка моста крана; 4 – серьга главного подъема крана; 5 – верхняя вилка гидронагружателя; 6 – нижняя вилка гидронагружателя; 7 – цилиндр гидронагружателя; 8 – серьга траверсы; 9 – траверса [Hydraulic loader: 1 – console protective sealed shell; 2 – crane girders; 3 – span of the crane bridge; 4 – an earring of the main crane lifting; 5 – upper fork of the hydraulic loader; 6 – bottom hydraulic forklift; 7 – hydraulic loader cylinder; 8 – traverse earring; 9 – traverse]

Как было сказано на все виды работ, включая обкатку, и статические испытания владелец крана дополнительно разрабатывает программу их осуществления. Как правило, за основу разработки, принимается программа, уже реализованная на другом, действующем блоке. То есть, на основе ранее уже реализованной программы, разрабатывается новая с изменением названия объекта, характеристик крана, с сохранением методики выполнения работ и методики контроля.

Таким образом, сложилось, что невозможно было технически выполнить в 1970-2000 гг., и что возможно реализовать сегодня, но не делается. В чем заключается суть проблемы. Кран кругового действия монтируется на рельсовом пути тогда и только так, когда оболочка недостроена. Мост крана подается на место монтажа через купольную часть, вне зависимости от методики – либо пролетными балками, либо мостом в сборе, и все оборудование комплектующее кран, портал, грузоподъемные телеги. Через рельс, балки, консоли нагрузку от собственного веса крана, а это порядка 500 тонн, воспринимает стена оболочки. Это приводит к ее деформации. Согласно порядку технологии монтажа крана, затем, выполняют монтаж кабелей и электрооборудования, при этом разворачивают кран на путях, вначале ручным приводом, затем при запитке по временной схеме крана – электроприводом. Параллельно достраивается оболочка, но она, тем не менее, не имеет 100% строительной готовности. На этапе испытания крана и когда им подаются и монтируются основные тяжеловесы реакторного отделения (корпус реактора и парогенераторы) нет полной строительной готовности оболочки. Полная строительная готовность защитной оболочки достигается непосредственно перед ее сдачей в эксплуатацию, когда она проходит этап преднапряжения системы СПЗО (системы преднапряжения защитной оболочки) и этап испытания на герметичность и прочность. Таким образом, на стадии монтажа крана, его наладки и выполнения им основных подъемно-транспортных операций при монтаже тяжеловесов, выполняется на недостроенной оболочке. По нашему мнению, на этих этапах, важно выполнять контроль не только параметров крана, но и параметров подкрановых конструкций и стены оболочки. Выявлять величины деформаций, их направления, следствия их проявления. Такие работы были проведены на соответствующих этапах строительства оболочки на четвертом блоке Ростовской АЭС, их некоторые результаты приведены ниже.

Так программа работ на статические испытания крана, разработанная подрядной монтажной организацией, заключалась в следующем. Мост полярного крана устанавливался по направлению осей II-IV. При этом предварительно на главном подъеме был закреплен гидравлический нагрузочный (см. рис. 1). Затем траверса гидронагрузочника была скреплена с тягами, смонтированными в главном зале реакторного отделения. Перед испытанием на подкрановом пути и на самом кране маркировались контролируемые точки (рис. 2).

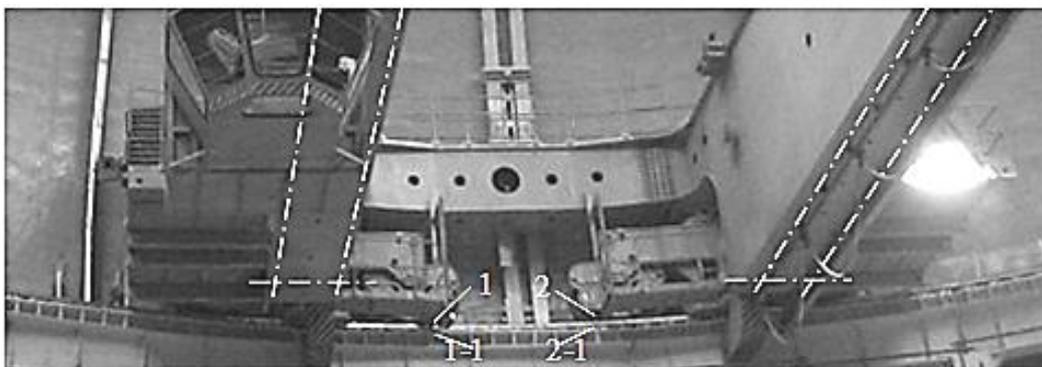


Рисунок 2 – Схема размещения контролируемых точек [Layout of controlled points]

На рисунке 2 точки 1-1, 2-1 находятся на головке рельса; точки 1, 2 крепятся на ободе ходовых колес крана; на другой стороне крана контрольные точки расположены симметрично.

Далее производилось нагружение крана гидронагружателем с усилием равным 125% паспортной грузоподъемности крана. При этом непрерывно вели наблюдения контролируемых точек. Результаты изменения строительного подъема моста приведена в таблице 1, схема размещения контролируемых точек приведена на рисунках 3 и 4 (изменение строительного подъема приведены в виде графика).

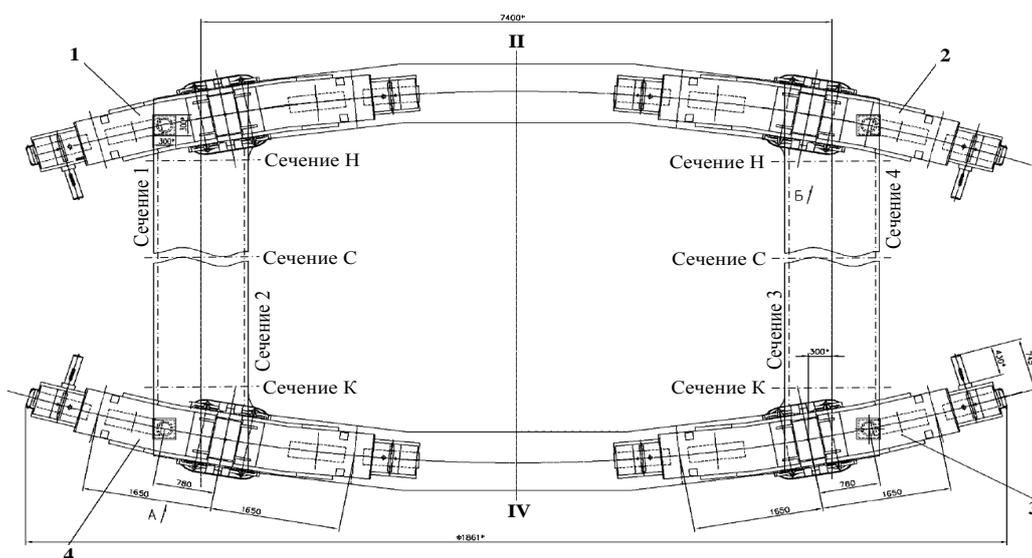


Рисунок 3 – Схема расположения контролируемых точек на кране кругового действия [Layout of the controlled points on the polar crane]

Таблица 1 – Динамика изменения строительного подъема моста крана при его статическом испытании [Dynamics of changes in the crane bridge construction lift during its static testing]

Название сечения	Разность отметок моста крана в мм				Средняя разность в мм	Прогиб моста крана в мм
	1	2	3	4		
Нагрузка 370 тон						
Н	-15	-15	-11	-14	-14	
С	-46	-51	-44	-42	-46	-33
К	-10	-15	-11	-11	-12	
Нагрузка 460 тон						
Н	-18	-17	-15	-16	-17	
С	-59	-61	-56	-53	-57	-42
К	-14	-17	-15	-14	-15	
сразу после снятия нагрузки						
Н	-5	0	0	-1	-1	
С	-4	-3	-5	-5	-4	-2
К	-1	-3	-2	-4	-2	
через 5 минут после снятия нагрузки						
Н	-2	0	0	-1	-1	
С	-3	-3	-4	-4	-4	-2
К	0	-3	-2	-3	-2	
через 1 час после снятия нагрузки						
Н	-1	0	0	0	0	
С	-1	-1	-2	-2	-2	-1
К	0	-1	0	-1	-1	

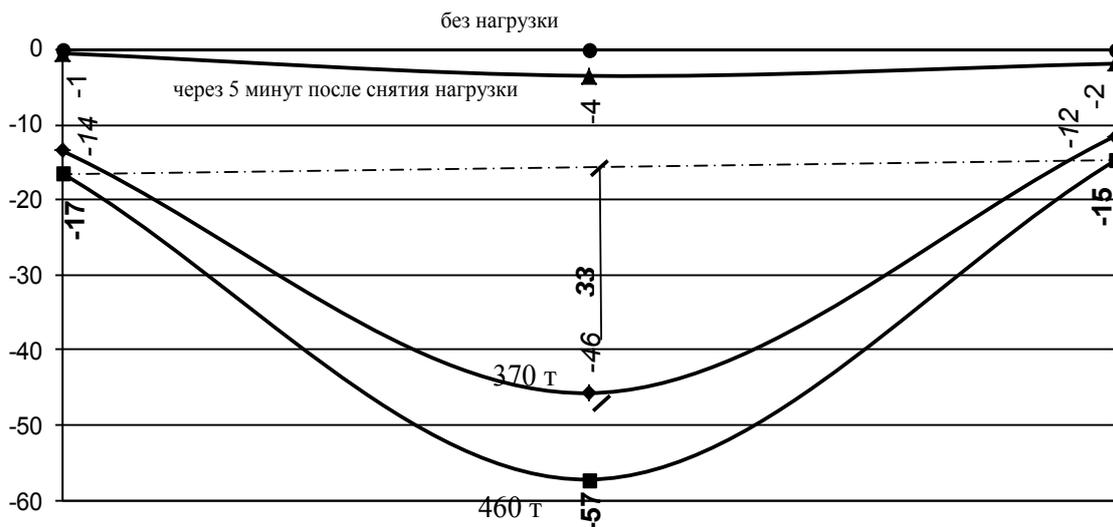


Рисунок 4 – Динамика изменения строительного подъема моста крана кругового действия при его статическом испытании [Dynamics of changes in the polar crane bridge construction lift during its static testing]

Результаты перемещения рельсового пути и ходовых колес крана представлены в таблице 2, где точки 1, 2, 3, 4 расположены на ближних к оси крана колесах главных балансиров, точки 1-1, 2-1, 3-1, 4-1 расположены на головке рельсового пути под соответствующими ходовыми колесами. Точность измерений перемещений составляла ± 0.5 мм.

Таблица 2 – Перемещения в радиальном направлении колес и головки рельсового пути [Movement of the wheels and the rail head in the radial direction]

№№ контрол. точек	Расположение контрол. точек	Усилие нагружения крана, т			
		0	370	460	0
		Перемещения, мм			
1	Колесо	0	2.8	2.7	1.1
1-1	Рельс	0	2.2	1.6	0.6
	разность		0.6	1.1	0.5
2	Колесо	0	2.2	2.7	0.9
2-1	Рельс	0	1.6	1.5	0.2
	разность		0,6	1,2	0,7
3	Колесо	0	1.4	1.5	0
3-1	Рельс	0	0.9	1.2	0
	разность		0,5	0,3	0
4	Колесо	0	1.7	1.8	0.8
4-1	Рельс	0	1.1	1.4	0.4
	разность		0,6	0,4	0,4

При подъеме реактора (масса реактора 320 т.) были выполнены контрольные измерения по точкам, расположенным на герметичной оболочке и головке рельсового пути крана. Схема размещения контрольных точек приведена на рисунке 5, где контрольные точки 1, 3, 7 расположены на рельсе, контрольные точки 2, 8, 9 расположены под консолями балок рельсового пути, а контрольные точки 6, 4 расположены выше консолей балок рельсового пути. Результаты измерений приведены в таблицах 3 и 4.

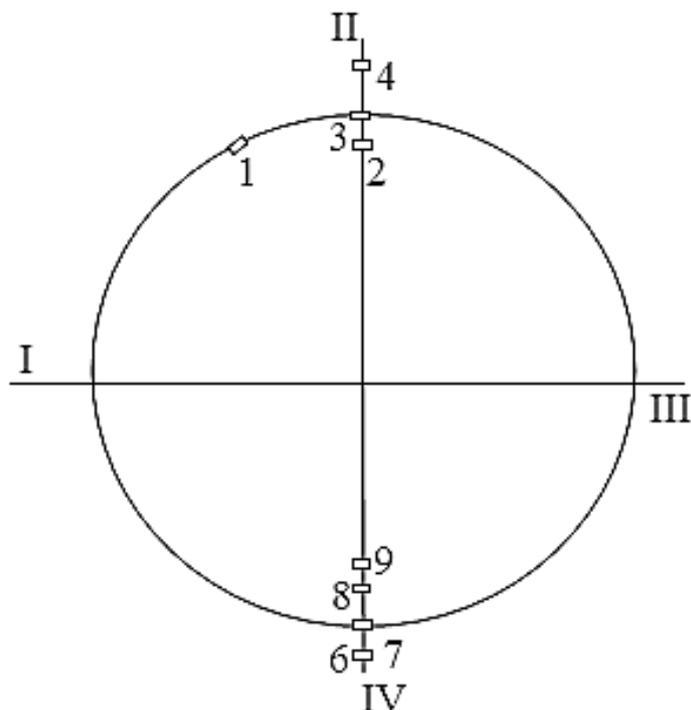


Рисунок 5 – Схема размещения контрольных точек [Layout of control points]

Таблица 3 – Перемещения головки рельсового пути по вертикали под нагрузкой [Moving the rail head vertically under load]

№, № контролируемых точек	Условные отметки контролируемых точек, мм				
	Без нагрузки	Установлен над точкой 1 кран	Подъем реактора	Реакор над бассеином реактора	Кран без нагрузки
1	0	-1.2	-4.4	-1.4	0.2
2					
3	0	-2.2	-1.4	-2.6	-0.14
4					
5	0				
6	0				
7	0	-0.6	-1.0	-1,4	0
8	0				
9	0				
10	0				

Таблица 4 – Взаимное перемещение диаметрально противоположных точек при подъеме реактора [Mutual movement of diametrically opposite points when lifting the reactor]

№№ контролируемых точек	Перемещения диаметрально противоположных точек, мм			
	Установлен над точкой 1 кран	Подъем реактора	Реакор над бассеином реактора	Кран без нагрузки
4-6	-1.1	-1.4		
7- 1	2.6	3.0	1.5	0.2
7- 3	0.6	0.6	1.6	0.2
2-8	0.8	1.2	2.2	0.9
2-9	0.4	0.7	0.4	0.1

Таким образом, полученные значения деформаций, выразившиеся в перемещениях, полученных на этапах статических испытаний крана и подъема корпуса реактора, совместно с другими деформациями проявившиеся на других реализованных этапах монтажа, наладки и первых этапах эксплуатации крана, явились детерминирующим фактором формирования трещин на стене оболочки с внешней ее стороны (рис. 6).



Рисунок 6 – Вертикальная трещина вблизи четвертой оси на внешней стороне оболочки [Vertical crack near the fourth axis on the outside of the shell]

При строительстве блоков АЭС необходимо выполнять мониторинг защитной оболочки на всех этапах ее возведения. После завершения строительства и сдачи оболочки в эксплуатацию и на стадии эксплуатации необходимо организовывать мониторинг оболочки на все время ее использования с оценкой ее технического состояния. Мониторинг необходимо осуществлять на основе контрольно-измерительных операций как штатной системой контроля, основанной на использовании встроенных в тело оболочки измерительных датчиков напряжений, перемещений, температуры, а также и внешних, мобильных измерительных систем [5].

Обязательно контролировать взаимовлияние защитной оболочки и крана радиального действия с момента монтажа крана на рельсовом пути и на все время эксплуатации.

Реализация данных предложений повысит безопасность атомных станций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гайрабеков, И. Г.* Результаты исследования измерения геометрических параметров крана радиального действия при его статических испытаниях / И. Г. Гайрабеков, И. Ю. Пимшин, М. Б. И. Гайрабеков, А. Т. А. Мишиева, А. И. Гайрабекова, Э. И. Ибрагимова // Перспективы развития топливно-энергетического комплекса и современное состояние нефтегазового инженерного образования в России : материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 105-летию М. Д. Миллионщикова. – ГГНТУ имени академ. М. Д. Миллионщикова, 2018. – С. 445-449.
2. *Пимшин, Ю. И.* Влияние крана кругового действия на техническое состояние строящейся защитной герметичной оболочки АЭС / Ю. И. Пимшин, Е. Б. Ключин, О. А. Губеладзе, В. Н. Медведев, С. М. Бурдаков, Ю. В. Заяров // Глобальная ядерная безопасность. – № 2 (19). – 2016. – С. 33-42.
3. НП-043-11. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов для объектов использования атомной энергии // Рег. в Минюсте РФ 03.02.2012. N 23122; Москва. – 14 с.
4. РД 22-28-36-01. Краны грузоподъемные. Типовые программы и методики испытаний. // Согласован с Госгортехнадзором России письмом от 13.09.01 № 12-07/938. Введен в действие с 01.10.2001.
5. ГОСТ 28609-90. Краны грузоподъемные. Основные положения расчёта. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 8 с.

6. Дунаев, И. М. Организация проектирования системы технического контроля / И. М. Дунаев, Т. П. Скворцов, В. Н. Чупырин. – Москва : Машиностроение, 1981. – 191 с.
7. Дубровский, В. Б. Строительство атомных электростанций / В. Б. Дубровский, П. А. Лавданский. – Москва : Ассоциация строительных вузов, 2006. – 336 с.
8. Забазнов, Ю. С. Разработка и исследование геодезического обеспечения диагностики технического состояния защитных оболочек АЭС : автореферат диссертации кандидата технических наук / Ю. С. Забазнов. – 2017. – 24 с.
9. Pimshin Yuri I., Zayarov Yuri V., Pimshin Ivan Yu. Evaluation of the Running Parameters of the Polar Cranes Installed in the NPP Reactor Compartments during their Control Assembly. MATEC Web of Conferences 224, 02077 (2018); ICMTMTE 2018. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822402077>. eISSN: 2261-236X. EDP Sciences.
10. Pimshin Yu.I., Zayarov Yu.V., Zabaznov Yu.S., Naumenko G.A. Theoretical Foundation of Civil Engineering Evaluating Containment Operational Reliability of Nuclear Power Plant Units with the WWER-1000 Reactor in Operation. MATEC Web of Conferences, Volume 196 (2018), XXVII R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP) (TFoCE 2018). URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819602038>. eISSN: 2261-236X. EDP Sciences
11. Pimshin Yu.I., Zabaznov Yu.S., Naumenko G.A. Operational Reliability Evaluation of the Containments of NPP Units during the Commissioning and Operation Phase. Materials Science Forum. Switzerland Trans Tech Publications. Switzerland. Vol. 931. P. 275-279. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.275>. ISSN: 1662-9752. Trans Tech Publications.
12. Pimshin Yu.I., Naugolnov V.A., Zayarov Yu.V., Tkachev. V.G. Technical Condition Assessment of Double-Layer Reinforced Concrete Shells of NPP-2006 and NPP-WWER TOI* Project Reactor Compartment. Procedia Computer Science, BICA 2018 (Ninth Annual Meeting of the BICA Society). Prague. Czech Republic. 2018. P. 782-787. URL: <https://doi.org/sciencedirect.com/Procedia Computer Science 145 782-787>. ISSN 1877-0509. Science Direct.

REFERENCES

- [1] Gajrabekov I.G., Pimshin I.Yu., Gajrabekov M.B.I., Mishieva A.T.A., Gajrabekova A.I., Ibragimova E.I. Rezul'taty` issledovaniya izmereniya geometricheskix parametrov krana radial'nogo dejstviya pri ego staticheskix ispy'taniyax [Results of the Study of Measuring the Geometric Parameters of A Radial Crane during its Static Tests]. Perspektivy` razvitiya toplivno-energeticheskogo kompleksa i sovremennoe sostoyaniye neftegazovogo inzhenerного obrazovaniya v Rossii : materialy` Vseros. nauch.-prakt. konfer., posvyashh. 105-letiyu M.D. Millionshchikova. [Prospects for the Development of the Fuel and Energy Complex and the Current State of Oil and Gas Engineering Education in Russia: materials All-Russian Scientific-Practical Conference. 105th anniversary of M.D. Millionshchikov]. Millionshchikov Grozny State Oil Technical University 2018. P. 445-449 (in Russian).
- [2] Pimshin Yu.I., Klyushin E.B., Gubeladze O.A., Medvedev V.N., Burdakov S.M., Zayarov Yu.V. Vliyanie krana krugovogo dejstviya na texnicheskoe sostoyaniye stroyashhejsya zashhitnoj germetichnoj obolochki AE`S [The Effect of a Circular Action Valve on the Technical Condition of the Protective Containment of NPP under Construction]. Global'naya yadernaya bezopasnost` [Global Nuclear Safety]. № 2 (19). 2016. P. 33-42 (in Russian).
- [3] NP-043-11. Federal'ny'e normy` i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj e`nergii. Pravila ustrojstva i bezopasnoj e`kspluatatsii gruzopod`emny`x kranov dlya ob`ektov ispol'zovaniya atomnoj e`nergii // Reg. v Minyuste RF 03.02.2012. [Federal Standards and Rules in the Field of Atomic Energy Use. Rules for the Construction and Safe Operation of Cranes for Atomic Energy Facilities // Reg. in the Ministry of Justice of the Russian Federation 03.02.2012]. № 23122. Moscow. 14 p. (in Russian).
- [4] RD 22-28-36-01. Krany` gruzopod`emny`e. Tipovy`e programmy` i metodiki ispy`tanij. // Soglasovan s Gosgortekhnadzorom Rossii pis`mom ot 13.09.01 № 12-07/938. Vveden v dejstvie s 01.10.2001 [RD 22-28-36-01. Lifting Cranes. Typical Programs and Test Methods. // It is coordinated with the Gosgortekhnadzor of Russia by the letter No. 12-07 / 938 of September 13, 2001. Entered into force from 10.10.2001] (in Russian).
- [5] GOST 28609-90. Cranes lifting. The main provisions of the calculation. – M.: Publishing house of standards, 1990. P. 8.
- [6] Dunaev I.M., Skvortsov T.P., Couperin V.N. Organizaciya proektirovaniya sistemy` texnicheskogo kontrolya [Organization design of the technical control]. Moscow: Mechanical Engineering, 1981. 191 p.
- [7] Dubrovsky V.B., Lavdansky P.A. Stroitel'stvo atomny`x e`lektrostantsij [Construction of nuclear power plants]. Moscow : Association of construction universities, 2006. 336 p.

- [8] Zabaznov, Yu.S. Razrabotka i issledovanie geodezicheskogo obespecheniya diagnostiki texnicheskogo sostoyaniya zashhitny`x obolochek AE`S : avtoreferat dissertacii kandata texnicheskix nauk [Development and Research of Geodetic Support of Diagnostics of the Technical State of the Protective Shells of Nuclear Power Plants: PhD thesis abstract]. 2017. 24 p. (in Russian).
- [9] Pimshin Y.I., Zayarov Yu.V., Pimshin I.Yu. Evaluation of the Running Parameters of the Polar Cranes Installed in the NPP Reactor Compartments during their Control Assembly. MATEC Web of Conferences 224, 02077 (2018); ICMTMTE 2018. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822402077>. eISSN: 2261-236X. EDP Sciences (in English).
- [10] Pimshin Yu.I., Zayarov Yu.V., Zabaznov Yu.S., Naumenko G.A. Theoretical Foundation of Civil Engineering Evaluating Containment Operational Reliability of Nuclear Power Plant Units with the WWER-1000 Reactor in Operation. MATEC Web of Conferences, Volume 196 (2018), XXVII R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP) (TFoCE 2018). URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819602038>. eISSN: 2261-236X. EDP Sciences (in English).
- [11] Pimshin Yu.I., Zabaznov Yu.S., Naumenko G.A. Operational Reliability Evaluation of the Containments of NPP Units during the Commissioning and Operation Phase. Materials Science Forum. Switzerland Trans Tech Publications. Switzerland. Vol. 931. P. 275-279. URL: <https://doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.931.275>. ISSN: 1662-9752. Trans Tech Publications (in English).
- [12] Pimshin Yu.I., Naugolnov V.A., Zayarov Yu.V., Tkachev. V.G. Technical Condition Assessment of Double-Layer Reinforced Concrete Shells of NPP-2006 and NPP-WWER TOI* Project Reactor Compartment. Procedia Computer Science, BICA 2018 (Ninth Annual Meeting of the BICA Society). Prague. Czech Republic. 2018. P. 782-787. URL: [https://doi.org/sciencedirect.com/Procedia Computer Science 145 782-787](https://doi.org/sciencedirect.com/Procedia%20Computer%20Science%20145%20782-787). ISSN 1877-0509. Science Direct (in English).

Problems of Protective Shell in Radial Crane Tests and its Use in Basic Heavy Structure Installation at the NPP Project

Yu.I. Pimshin ^{*1}, A.S. Demidenko ^{*2}, I.Yu. Pimshin ^{**3}

^{*}*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 34736*

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

¹*ORCID iD: 0000-0001-6610-8725*

WoS Researcher ID: J-6791-2017

e-mail: yipimshin@mephi.ru

²*ORCID iD: 0000-0003-2847-2977*

e-mail: aleksdem76@gmail.com

³*ORCID iD: 0000-0002-8267-3617*

WoS Researcher ID: O-8809-2018

e-mail: ivan.pimschin@yandex.ru

Abstract – The paper discusses the issues of testing the crane and the rise of the reactor vessel. These technological procedures are associated with the influence of the crane on the shell. The consequence of this effect is the partial destruction of the shell wall which is expressed by the formation of cracks on the outside of the shell. A proposal on the need to organize monitoring both at the construction stage and at the stage of shell operation is made. It increases the NPP safety.

Keywords: nuclear power plant, polar crane, protective hermetic casing, deformations, cracks.

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

УДК 629.4.082.32

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СТАНЦИЯ ДЛЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ И
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЕМКОСТИ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ**

© 2019 С.А. Баран, Г.П. Сметанкин

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

Работа посвящена вопросам модернизации технологии обслуживания аккумуляторных батарей для электрического транспорта. Рассматриваются методы зарядки аккумуляторных батарей, приводится структурная схема автоматической установки для заряда аккумуляторных батарей асимметричным током.

Ключевые слова: аккумуляторные батареи, заряд, разряд, асимметричный ток, станция автоматическая зарядно-разрядная, техническое обслуживание.

Поступила в редакцию 21.06.2019

После доработки 09.08.2019

Принята к публикации 13.08.2019

Одной из важных составных частей подвижного состава являются аккумуляторные батареи, от них зависит надежность и безотказность работы автоматики, обеспечение электроэнергией машин и механизмов во время стоянок и первоначального пуска, а также питание схем управления электровозов при прохождении нейтральных вставок. Для обеспечения надежной и долговечной работы аккумуляторной батареи необходимо проведение регламентных работ, периодический разряд и заряд батареи для снятия пассивации электродов, сезонная смена электролита и промывка [1]. Для обслуживания аккумуляторных батарей необходимо привлечение квалифицированного персонала и организация круглосуточного режима работы. Не секрет, что при работе в ночной смене внимательность персонала снижается и более вероятен технологический брак, который может привести к выходу из строя отдельных элементов или всей батареи в целом. Работающее в настоящее время оборудование для обслуживания аккумуляторных батарей в депо морально устарело и физически изношено, что требует постоянного внимания при работе с ним. В то же время, его модернизация без изменения технологии переподготовки батарей приводит лишь к увеличению как первичных затрат, так и эксплуатационных расходов.

В ОАО «ВЭлНИИ» на основании теоретических разработок и многолетних экспериментальных исследований выявлены закономерности поведения никель-кадмиевых аккумуляторных батарей при заряде асимметричным током. По заказу МО РФ разработаны и апробированы на производстве способы автоматического ускоренного заряда никель-кадмиевых аккумуляторных батарей асимметричным током, предназначенные для эксплуатации герметичных и вентилируемых батарей различного назначения, позволяющие сократить время переподготовки батарей более чем в два раза без ухудшения эксплуатационных характеристик [2].

Разработанные способы успешно применяются для эксплуатации и обслуживания закрытых никель-кадмиевых аккумуляторных батарей различной номинальной емкости и технологии изготовления. Данные режимы реализованы в зарядно-разрядной станции для обслуживания электровозных батарей. Эффективность заряда аккумуляторной батареи асимметричным током связана с тем, что короткий разрядный импульс тока разряжает поверхность пластин заряжаемого аккумулятора, не проникая в глубину электрода, в результате заряд аккумулятора проходит при более низком напряжении (рис. 1), что ведет к уменьшению газовыделения и отсутствию потерь электролита вследствие «выкипания». Пониженное напряжение на аккумуляторной батарее уменьшает энергозатраты при заряде, а отсутствие газовыделения говорит о том, что практически весь ток заряда используется на электрохимическую реакцию преобразования активной массы, и только в конце заряда, когда большая часть активной массы преобразована, напряжение на батарее растет, повышается интенсивность выделения газа и увеличивается температура аккумуляторной батареи. Найденные критерии оценки состояния батареи позволяют осуществлять контроль процесса заряда в реальном масштабе времени и производить заряд никель-кадмиевых аккумуляторных батарей асимметричным током в автоматическом режиме. Исследования показали, что эксплуатация аккумуляторных батарей при заряде режимами асимметричного тока увеличивает емкость аккумуляторов на 10-20% и позволяет увеличить срок службы батарей [3-4].

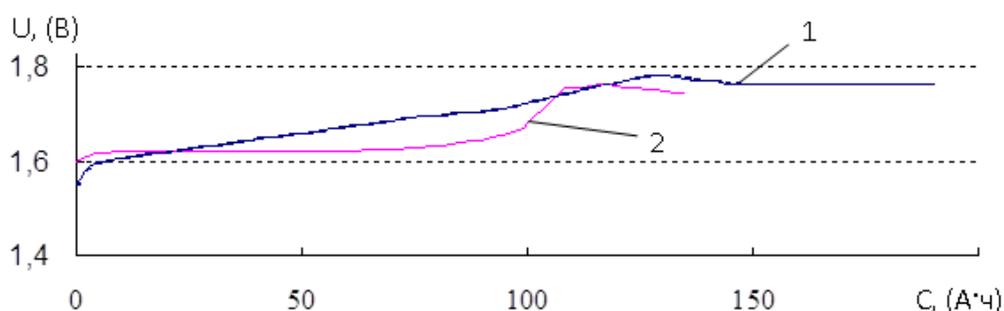


Рисунок 1 – Графики роста напряжения на аккумуляторе НК-125 при заряде: 1 – постоянным током; 2 – асимметричным током [Graphs of voltage growth on the NK-125 battery when charging: 1 – direct current; 2 – asymmetric current]

При заряде аккумуляторных батарей постоянным током ток заряда распределяется между двумя составляющими: током заряда поверхности пористого электрода и током заряда, который по порам проникает в глубину электрода. В зависимости от коэффициента пористости, до 80% площади поверхности электрода находится в порах. Доступ зарядного тока к активной массе, находящейся в порах, осуществляется по электролиту, как по проводящей среде. Одной из составляющих, препятствующих проникновению тока заряда в глубину электрода, является омическое сопротивление электролита в поре. Часть тока заряда расходуется на электролиз воды, пузырьки газа образовавшиеся в порах уменьшают площадь сечения проводящей среды, тем самым, увеличивая омическое сопротивление электролита в поре и препятствуя прохождению тока в глубину поры. Таким образом, происходит вытеснение тока на поверхность электрода, зарядная реакция концентрируется на поверхности электрода, с ростом заряженности потенциал поверхности повышается, а, соответственно, повышается интенсивность выделения газа, образующиеся пузырьки перекрывают поры и препятствуют прохождению тока в глубину электрода. Для полного заряда аккумуляторной батареи в соответствии с ТУ ей необходимо сообщить

$3C_{\text{ном}}$. Газовые пузырьки, выходя из устьев пор, выталкивают активную массу и токопроводящее связующее. Происходит так называемое «вымывание» активной массы, в результате чего

образуется необратимая потеря емкости аккумуляторов, а токопроводящее связующее, оседая на дне банки, увеличивает саморазряд и может привести к короткому замыканию между пластинами аккумулятора. Следовательно, активное газовыделение при заряде снижает срок службы батареи.

При заряде асимметричным током происходит равномерное распределение заряда по толщине электрода, и полный заряд активной массы происходит при сообщении аккумуляторной батарее $1,2 \div 1,4C_{\text{ном}}$ без активного газовыделения и разогрева батареи, благодаря чему срок службы батарей увеличивается.

В локомотивном депо «Самара» Куйбышевской железной дороги эксплуатируется современная станция САЗР-4,5-380/100-УХЛ4-202 для обслуживания щелочных аккумуляторных батарей электровозов. Станция создана в ОАО «ВЭЛНИИ», г. Новочеркасск, по заказу Куйбышевской ж.д. Первый вариант станции заряда аккумуляторных батарей асимметричным током около десяти лет эксплуатируется в локомотивном депо Каменоломни С.К.Ж.Д.

В станции реализованы режимы заряда асимметричным током, которые позволяют сократить время межсезонной переподготовки электровозных аккумуляторных батарей, и обеспечивают экономию электроэнергии в 3,5 раза без ухудшения характеристик аккумуляторных батарей. Благодаря пониженному газовыделению при заряде отсутствуют потери электролита, тем самым снижается экологическая нагрузка на окружающую среду. Разработанная с использованием современных достижений науки и технологии, зарядная станция отвечает всем требованиям, предъявляемым к промышленному оборудованию: высокую надежность, экономичность, простоту в обслуживании, экологичность. Автоматизация обеспечивает проведение выбранного режима работы без участия оператора [5-7].

Станция автоматическая зарядно-разрядная (рис. 2) позволяет проводить в автоматическом режиме заряд электровозной аккумуляторной батареи 42НК-125 асимметричным током, разряд постоянным током, тренировку аккумуляторной батареи после смены электролита до набора необходимой величины емкости.



Рисунок 2 – Блок-схема заряд-разрядной станции [Block diagram of a charge-discharge station]

С помощью органов управления и индикации станция позволяет выбрать и запустить необходимый режим работы, встроенный микропроцессор позволяет адаптировать станцию под требования заказчика и вводить новые режимы заряда.

Использование САЗР позволяет в два раза сократить время, необходимое для восстановления емкости аккумуляторной батареи и исключить потери электролита при заряде.

Выпрямленное входное 3-фазное напряжение 380В поступает на полноуправляемый мостовой инвертор, который формирует переменное высокочастотное напряжение для трансформатора. Вторичные обмотки трансформатора подключены к выпрямителю и, далее, к выходному фильтру, которые формируют промежуточное стабилизированное напряжение для формирователя зарядного тока. Для создания разрядного импульса асимметричного тока используется схема с рекуперацией энергии, что повышает КПД установки. Стандартный разряд аккумуляторной батареи осуществляется на активную нагрузку за счет собственного напряжения, а схема управления поддерживает ток разряда постоянным. Управление силовой частью, контроль параметров установки, определение конца заряда (разряда) батареи, индикацию параметров батареи осуществляет микропроцессорная система управления. Автоматизация процесса позволяет упростить обслуживание аккумуляторных батарей и уменьшить вероятность ошибок оператора при обслуживании.

Использование в установке метода передачи энергии на высокой частоте позволяет значительно снизить габариты и массу трансформатора и всей установки в целом, и повысить КПД [8-9].

Таблица 1 – Сравнительные данные по вводу в действие батареи при смене электролита на установке УЗА 43А-150-80 и новой заряд-разрядной станции САЗР-4,5-380/100-УХЛ4-202 [Comparative data on the battery commissioning when changing the electrolyte at the UZA 43A-150-80 unit and the new charge-discharge station SAZR-4,5-380 / 100-UHL4-202]

Параметры	УЗА 43А-150-80	САЗР-4,5-380/100-УХЛ4-202
Время заряда	12 часов	4,5 часа
Сообщаемая емкость в % от номинальной ($C_{ном}$)	300%	120%
Ток разряда	$0,1C_{ном}$ до напряжения 1В на аккумулятор	$0,1C_{ном}$ до напряжения 1В на аккумулятор
Вспенивание электролита	Присутствует	Отсутствует
Макс. количество циклов	4	3
Время ввода батареи в эксплуатацию	88 часов	43,5 часа
КПД устройства	0,65	0,9
Габариты (мм)	600x600x1600	500x320x900
Масса (кг)	265	~ 50
Потребление энергии на один цикл заряда/разряда (кВт·час)	43,7	11,6
Потребление энергии за период ввода батареи в эксплуатацию (кВт·час)	174,8	34,8

Сравнительные данные по вводу в действие батареи при смене электролита на новой заряд-разрядной станции (из опыта эксплуатации САЗР-4,5-380/100-УХЛ4-202 в депо «Самара» Куйбышевской Ж.Д.) и установки УЗА 43А-150-80, эксплуатируемой в депо в настоящее время, приведены в таблице 1 [10-12]. Данные по аккумулятору НК-125 взяты из ФБО.358.011 ТО.

Таким образом, техническое обслуживание одной батареи в течение года на новой заряд-разрядной станции дает экономию электроэнергии около 80%. Расчетный срок окупаемости станции менее года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таймаров, М. А. Повышения надёжности аккумуляторных батарей / М. А. Таймаров, И. З. Багаутдинов // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – № 13. – С. 311-313.
2. Сметанкин, Г. П. Исследование эффективности заряда никель-кадмиевых аккумуляторных батарей асимметричным и постоянным током / Г. П. Сметанкин, А. С. Бурдюгов, С. С. Матекин // Электрохимическая энергетика. – 2008. – № 3. – С. 164-167.
3. Чупин, Д. П. Методы диагностики аккумуляторных батарей / Д. П. Чупин // Измерение, контроль, информатизация: материалы XIII Международной научно-технической конференции, Барнаул, т. 1. – Барнаул : АлтГТУ, 2012. – С. 164-168.
4. Кликушин, Ю. Н. Метод оперативной оценки емкости аккумуляторных батарей / Ю. Н. Кликушин, Д. П. Чупин // Измерение, контроль, информатизация: материалы XIII Международной научно-технической конференции, Барнаул, т. 1. – Барнаул : АлтГТУ, 2012. – С. 158-161.
5. Ситников, А. В. Аккумуляторные батареи носимых электронных устройств // А. В. Ситников, С. И. Масленникова // Радиостроение. – 2017. – № 05. – С. 52-72
6. Лазарев, Г. Б. Управление эффективностью механизмов собственных нужд ТЭС / Г. Б. Лазарев // Энергия единой сети. – 2012. – № 5. – С. 58-67.
7. Малафеев, А. В., Тремасов М. А. Анализ устойчивости двигателей собственных нужд тепловых электростанций с учетом характеристик приводных механизмов / А. В. Малафеев, М. А. Тремасов // Электротехнические системы и комплексы. – 2016. – № 4. – С. 6-13. – DOI.org/10.18503/2311-8318-2016-4(33)-6-13.
8. ПУЭ «Правила устройства электроустановок. Издание 7» от 8 июля 2002 № 204 / Минэнерго РФ. 1 января 2003 г. – URL : <https://www.elec.ru/library/direction/pue.html>.
9. Рожкова, Л. Д. Электрооборудование станций и подстанций / Л. Д. Рожкова, В. С. Козулин. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
10. Садовников, А. В. Литий-ионные аккумуляторы / А. В. Садовников, В. В. Макаrchук // Молодой ученый. – 2016. – № 23. – С. 84-89.
11. Цивадзе, А. Ю. Фундаментальные проблемы литий-ионных аккумуляторов / А. Ю. Цивадзе, Т. Л. Кулова, А. М. Скундин // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2013. – № 2. – С. 149. – DOI.org/10.7868/S0044185613020083.
12. Сысолятин, В. Ю. Цифровое устройство заряда-разряда химических источников тока / А. Ю. Сысолятин // Омский научный вестник. – 2012. – № 3. – С. 241-245.

REFERENCES

- [1] Taimarov M.A., Bagautdinov I.Z. Improving the Reliability of Batteries. Bulletin of Kazan Technological University. 2014. № 13. P. 311-313.
- [2] Smetankin G.P., Burdyugov A.S., Matekin S.S. Investigation of Charge Efficiency of Nickel-Cadmium Rechargeable Batteries by Asymmetric and Direct Current. Electrochemical Power Engineering 2008. № 3. P. 164-167.
- [3] Chupin D.P. Diagnostic Methods of Battery Batteries. Measurement, Control, Informatization: Materials of the Thirteenth International Scientific and Technical Conference V. 1. Barnaul: AltSTU, 2012. P. 164-168.
- [4] Klikushin Yu.N., Chupin D.P. Method of Rapid Assessment of Battery Capacity. Measurement, Control, Informatization: Materials of the Thirteenth International Scientific and Technical Conference V. 1. Barnaul: AltSTU, 2012. P. 158-161.
- [5] Sitnikov A.V., Maslennikova S.I. Rechargeable Batteries of Wearable Electronic Devices. Radiostroenie. 2017. № 05. P.52-72

- [6] Lazarev G.B. Managing the Efficiency of Mechanisms for the Own Needs of TPPs. Energy of the Unified Network. 2012. № 5. P. 58-67.
- [7] Malafeev A.V., Tremasov M.A. Analysis of Engine Stability of their Own Needs of Thermal Power Plants Taking into Account the Characteristics of the Driving Mechanisms. Electrical Systems and Complexes. 2016. № 4. P. 6-13. DOI.org/10.18503/2311-8318-2016-4(3333-6-13).
- [8] PUE Rules for Electrical Installations. Edition 7 dated July 8, 2002 № 204. Ministry of Energy of the Russian Federation. January 1. 2003
- [9] Rozhkova, L.D., Kozulin, V.S. Electrical Equipment of Stations and Substations. 3rd ed. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 648 p.
- [10] Sadovnikov A.V., Makarchuk V.V. Lithium-Ion Batteries. Young Scientist. 2016. № 23. P. 84-89.
- [11] Tsivadze, A.Yu., Kulova, T.L., Skundin, A.M. Fundamental Problems of Lithium-Ion Batteries. Physicochemistry of the Surface and Protection of Materials. 2013. № 2. P. 149. DOI.org/10.7868/S0044185613020083.
- [12] Sysolyatin V.Yu. Digital Charge-Discharge Device for Chemical Current Sources. Omsk Scientific Herald 2012, № 3. P. 241-245.

Automated Station for Maintenance and Restoration of Battery Capacity In Depot

S.A. Baran¹, G.P. Smetankin²

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

1 ORCID iD: 0000-0002-3232-4072

WoS Researcher ID: I-7933-2018

e-mail: bastr@rambler.ru

2 ORCID iD: 0000-0002-8191-6496

e-mail: nvo_@mail.ru

Abstract – The work is devoted to the issues of modernization of the maintenance technology for electric vehicle batteries. It considers methods for charging batteries, gives a block diagram of an automatic installation for charging batteries with an asymmetric current.

Keywords: rechargeable batteries, charge, discharge, asymmetric current, automatic charge-discharge station, maintenance.

УДК 621.039

**СНИЖЕНИЕ ОБЪЕМА БОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЗАПАСА
РЕАКТИВНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЫГОРАЮЩЕГО
ПОГЛОТИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ (Gd_2O_3) В ТОПЛИВЕ
РЕАКТОРА ВВЭР-1200**

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

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Рассматриваются различные схемы размещения выгорающего поглотителя в системе компенсации избыточной реактивности в реакторе типа ВВЭР при удлинённых кампаниях с целью снижения максимальной концентрации борного поглотителя. На основе по вариантной оптимизации анализируется влияние способа размещения выгорающего поглотителя в твэгах (гомогенное и гетерогенное) и количество размещаемого выгорающего поглотителя в них, на максимальную величину запаса реактивности, компенсируемую системой борного регулирования.

Ключевые слова: Выгорающий поглотитель (ВП), гомогенный (ГВП) и гетерогенный (ГТВП) выгорающий поглотитель, Serpent, ВВЭР, ТВС, полиячейка, максимальная концентрация борной кислоты, система жидкостного регулирования, избыточная реактивность, коэффициент размножения ТВС (K_{∞}).

Поступила в редакцию 19.06.2019

После доработки 05.07.2019

Принята к публикации 07.07.2019

Введение

В реакторах ВВЭР по мере усовершенствования топливного цикла переходят на удлинённые кампании реактора, при этом также требуется повышение обогащения топлива подпитки. Для компенсации возникающей избыточной реактивности на одну кампанию применяется как традиционная система, основанная на борном регулировании, так и размещение в топливе выгорающих поглотителей, в основном гадолиния. Учитывая, что при высокой концентрации борного поглотителя в теплоносителе плотностной коэффициент реактивности по теплоносителю может принимать отрицательные значения, что при высокой концентрации борного поглотителя в теплоносителе плотностной коэффициент реактивности по теплоносителю может принимать отрицательные значения, что при выбранных параметрах решетки влияет на условия ядерной безопасности реакторной установки АЭС (НП 082-07) [1-4, 11], необходимо всемерно увеличивать долю избыточной реактивности, компенсируемую с помощью выгорающих поглотителей [5-9].

В идеале снижение концентрации выгорающего поглотителя при работе реактора должно было бы происходить так, чтобы высвобождаемая при этом реактивность примерно соответствовала падению реактивности за счет выгорания топлива. В этом случае существенно сокращается применение подвижных органов регулирования для поддержания критичности при работе реактора в стационарном режиме, а диапазон изменения концентраций борной кислоты будет наименьшим. Считается, что такого идеального соответствия в водо-водяных реакторах достичь невозможно, хотя положительный эффект от применения выгорающих поглотителей весьма ощутим [10].

Скорость изменения количества ядер ВП во времени описывается уравнением, которое абсолютно аналогично уравнению выгорания для ^{235}U . Тогда:

$$\frac{dN_{\text{ВП}}}{dN_5} = \frac{N_{\text{ВП}} \sigma_a^{\text{ВП}} \phi_{\text{ВП}}}{N_5 \sigma_a^5 \phi_5}$$

При гомогенном размещении ВП в топливе (ГВП) поток тепловых нейтронов, действующих на выгорающий поглотитель и на ^{235}U , будет одинаковым $\phi_{\text{ВП}} = \phi_5$ и отношение скоростей выгорания ВП и ^{235}U зависит от изменения $N_{\text{ВП}}$ и N_5 во времени. В реальной ТВС, где ВП размещается только в нескольких из 312 твэлов, распределение потока тепловых нейтронов по твэлам зависит от количества ВП в каждом твэле, количества твэгов и обогащения топлива. Поскольку сечение поглощения тепловых нейтронов для Gd высокое [12], его наличие в ТВС сильно влияет на распределение потоков тепловых нейтронов, что оказывает существенную роль на скорость выгорания различных изотопов в ТВС.

При гетерогенном размещении ВП в ТВС (ГТВП) он сначала выгорает в поверхностном слое (с объемом $2\pi r dr$), где расположен ВП, а затем поверхностные слои становятся прозрачными, и начинается уже объемное выгорание (в объеме πr^2) [10]. Поэтому, снижение избыточной реактивности за счет ВП в этом случае меньше, чем для гомогенного размещения.

Для описания частичных перегрузок примем следующую модель. Во-первых, будем рассматривать перегрузки без перестановок ТВС. В этом случае в активной зоне можно выделить элемент периодичности, состоящий из ТВС с различными длительностями облучения. Во-вторых, коэффициент размножения поляячейки периодичности в простейшем случае возьмем равным среднему арифметическому по всей совокупности ТВС, образующих поляячейку. В этом случае изменение коэффициента размножения поляячейки со временем можно представить в следующем виде:

$$\bar{K}^{POLY}(t) = \frac{K_{\infty}^{TBC}(t) + K_{\infty}^{TBC}(t+T) + K_{\infty}^{TBC}(t+2T)}{3} \quad (1)$$

Длина кампании реактора определяется из условия, что в конце кампании усредненный коэффициент размножения поляячейки равен критическому значению, обеспечивающему значение $K_{\text{эф}}=1$.

$$\bar{K}_{\infty}^{POLY}(T) = \frac{K_{\infty}^{TBC}(T) + K_{\infty}^{TBC}(2T) + K_{\infty}^{TBC}(3T)}{3} = K_{\infty}^{CRIT} \quad (2)$$

В первую очередь в качестве базового случая рассмотрим применение этой модели для варианта без компенсации избыточной реактивности (В1, табл. 1). Для полутора годичной кампании кратность перегрузки будет равна трем. Рассмотрим зависимость коэффициента размножения от времени (выгорания) для ТВС без гадолия. Удлиненную кампанию для трехкратной перегрузки топлива примем равной 480 суток. Тогда с помощью соотношения 2 для коэффициента размножения ТВС без выгорающего поглотителя на конец кампании получим значение K_{∞}^{CRIT} , которое будет использовано для всех остальных вариантов.

Постановка задачи

Для расчетного анализа поставленной задачи были выбраны несколько вариантов использования ВП в ТВС с разными концентрациями и разным расположением в них (варианты В₁-В₁₀). Для каждого из них был проведен расчет изменения коэффициента размножения ТВС в зависимости от глубины выгорания топлива. Исходные данные по загрузке ВП в ТВС и их геометрические характеристики для этих вариантов представлены в таблице 1 и на рисунках 1а, 1б и 2.

Таблица 1 – Распределение ВП в рассмотренных вариантах расчетов [Distribution of BA in the considered variants of calculations]

Вариант	Масса Gd, г/ТВС	Количество и состав топлива твэлов и твэгов
В ₁		312-4,90% (²³⁵ U)
В ₂	878 (ГВП)	300-4,95% (²³⁵ U) и 12-3,65% (²³⁵ U) с 5,0%Gd ₂ O ₃
В ₃	878 (ГВП)	288-4,95% (²³⁵ U) и 24-4,30% (²³⁵ U) с 2,5%Gd ₂ O ₃
В ₄	890 (ГВП)	228-4,95% (²³⁵ U) и 84-4,80% (²³⁵ U) с 0,7%Gd ₂ O ₃
В ₅	1409 (ГВП)	288-4,95% (²³⁵ U) и 24-4,30% (²³⁵ U) с 4,0%Gd ₂ O ₃
В ₆	1928 (ГВП)	288-5,00% (²³⁵ U) и 24-3,70% (²³⁵ U) с 5,5%Gd ₂ O ₃
В ₇	2611 (ГВП)	288-5,00% (²³⁵ U) и 24-3,70% (²³⁵ U) с 7,5%Gd ₂ O ₃
В ₈	1762 (ГВП)	282-5,00% (²³⁵ U) и 30-3,90% (²³⁵ U) с 4,0%Gd ₂ O ₃
В ₉	2644 (ГВП)	276-5,00% (²³⁵ U) и 36-4,13% (²³⁵ U) с 5,0%Gd ₂ O ₃
В ₁₀	3523 (ГВП)	270-5,00% (²³⁵ U) и 42-4,26% (²³⁵ U) с 5,7%Gd ₂ O ₃
В ₁₁	887 (ГТВП)	312-4,90% (²³⁵ U), 84-с толщиной Gd ₂ O ₃ 0,0142 см (в отверстие твэга)
В ₁₂	1420 (ГТВП)	312-4,90% (²³⁵ U), 84-с толщиной Gd ₂ O ₃ 0,0195 см (в отверстие твэга)
В ₁₃	1952 (ГТВП)	312-4,90% (²³⁵ U), 84-с толщиной Gd ₂ O ₃ 0,0291 см (в отверстие твэга)
В ₁₄	2662 (ГТВП)	312-4,90% (²³⁵ U), 84-с толщиной Gd ₂ O ₃ 0,0478 см (в отверстие твэга)
В ₁₅	887 (ГТВП)	312-4,90% (²³⁵ U), 126-с толщиной Gd ₂ O ₃ 0,0131 см (в отверстие твэга)
В ₁₆	1775 (ГТВП)	312-4,90% (²³⁵ U), 180-с толщиной Gd ₂ O ₃ 0,0167 см (в отверстие твэга)
В ₁₇	2661 (ГТВП)	312-4,90% (²³⁵ U), 222-с толщиной Gd ₂ O ₃ 0,0131 см (в отверстие твэга)
В ₁₈	3549 (ГТВП)	312-4,90% (²³⁵ U), 240-с толщиной Gd ₂ O ₃ 0,0167 см (в отверстие твэга)
В ₁₉	2653 (ГВП) и (ГТВП)	288-4,95% (²³⁵ U), 93-с толщиной Gd ₂ O ₃ 0,0161 см (в отверстие твэга) и 24-4,3% (²³⁵ U) с 3,75% Gd ₂ O ₃ .
В ₂₀	3536 (ГВП) и (ГТВП)	282-5,0% (²³⁵ U), 102-с толщиной Gd ₂ O ₃ 0,0202 см (в отверстие твэга) и 30-4,0% (²³⁵ U) с 40% Gd ₂ O ₃ .

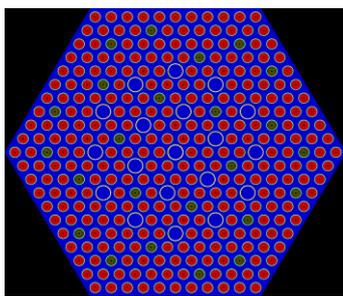


Рисунок 1а – Размещение ВП в ТВС (В₃, В₅-В₇)
[The placement of the BAs in FA (B₃, B₅-B₇)]

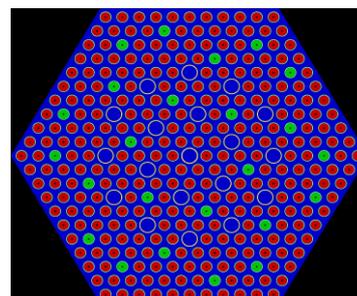


Рисунок 1б – Размещение ВП в ТВС (В₈-В₁₁) [The placement of the BAs in FA (B₈-B₁₁)]



Рисунок 2 – Геометрия твэлов (без ВП, ГВП и ГТВП) [The geometry of the fuel rods (without the BAs, HBA, and NHBA)]

Для расчета зависимости коэффициента размножения ТВС от глубины выгорания топлива использовался код SERPENT (2.1.30) [13] и библиотека ядерных данных ENDFb7 [14]. Расчет осуществлялся при средних стандартных значениях температур топлива и теплоносителя и средней плотности теплоносителя.

Результаты расчетных исследований

На первом этапе расчетных исследований были рассмотрены варианты В₁-В₄, в которых изменялось число твэгов в ТВС, но при этом общее количество гадолиния и урана-235 в ТВС оставалось неизменным. Вариант В₁ предполагает чисто жидкостное регулирование запаса реактивности без использования выгорающего поглотителя. Для выбранного количества гадолиния в ТВС он успевает выгореть за одну кампанию. В этом случае в выражение усредненного коэффициента размножения (формула (2) слагаемые ($K_{\infty}(T+t) + K_{\infty}(2T+t)$) будут одинаковыми для всех этих вариантов. Поэтому характер изменения усредненного коэффициента размножения полиячейки $K_{\infty}^{POLY}(t)$ временным изменением коэффициента размножения ТВС $K_{\infty}^{TBC}(t)$ на интервале первой кампании ТВС. Соответствующие расчетные характеристики рассматриваемых величин представлены на рисунках 3 и 4.

При малом числе твэгов в ТВС на один твэг в среднем приходится много твэлов и основное влияние на временное изменение $\bar{K}_{\infty}^{POLY}(t)$ оказывают именно твэлы. Суммарное воздействие таково, что выгорание топлива в ТВС приводит к снижению этой величины, а выгорание гадолиния приводит к ее росту. Но поскольку в начале кампании из-за блокировки внутренних слоев твэга выгорание гадолиния происходит медленно, влияние твэлов в начале кампании невелико. Поэтому наличие твэгов снижает начальную величину $\bar{K}_{\infty}^{POLY}(0)$ и приводит к более медленному снижению этой величины. В дальнейшем по мере выгорания гадолиния и снижения его блокировки роль твэга возрастает и резко увеличивается спад коэффициента размножения полиячейки, приближаясь к зависимости для варианта без твэгов.

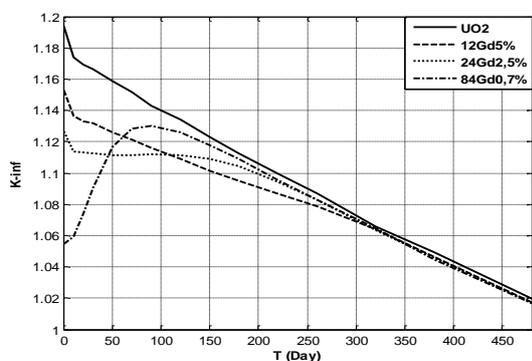


Рисунок 3 – Временная зависимость $K_{\text{инф}}$ полиячейки для вариантов В₁-В₄ [$K_{\text{инф}}$ of poly-cell depending on burnup depth for variants В₁-В₄]

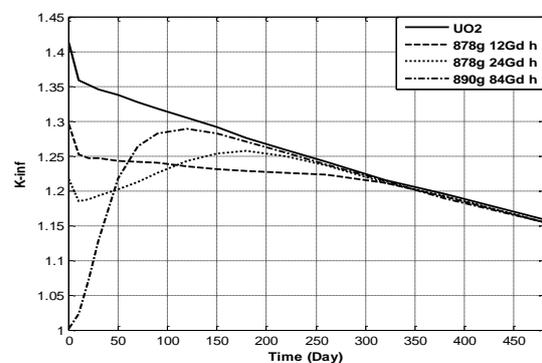


Рисунок 4 – Временная зависимость $K_{\text{инф}}$ ТВС в первой кампании для вариантов В₁-В₄ [$K_{\text{инф}}$ of FA in first campaign depending on burnup depth for variants В₁-В₄]

Увеличивая количество твэгов при одновременном снижении загрузки гадолиния в твэл приводит к резкому изменению характера временного поведения $\bar{K}_{\infty}^{POLY}(t)$ за счет увеличения роли твэгов и уменьшения числа твэлов, приходящихся на один твэг.

Поэтому снижение реактивности за счет ВП увеличивается, что приводит к уменьшению коэффициента размножения нейтронов в начале кампании. Однако быстрое выгорание Gd высвобождает реактивность и приводит к росту коэффициента размножения нейтронов (В₄). В результате этого имеет место выбег реактивности в варианте В₄ вплоть до момента времени порядка 80 суток. Максимальный коэффициент размножения нейтронов в этом варианте уменьшается от значения для базового варианта В₁ на 0,064 ($\Delta K_{\text{инф.макс.}} = 0,064$). В варианте В₃ соотношение скорости

высвобождения реактивности и скорости уменьшения запаса реактивности за счет выгорания топлива до момента времени 150-200 суток примерно равны и максимальный коэффициент размножения нейтронов уменьшается по сравнению с базовым вариантом V_1 на 0,068 ($\Delta K_{\text{инф.макс.}} = 0,068$). Таким образом, минимальное значение максимальной величины коэффициента размножения полячейки за первую кампанию, а значит и минимальное значение концентрации борного поглотителя для жидкостной системы регулирования, достигается для варианта V_3 .

Во второй серии вариантов был проведен расчёт для гомогенного размещения гадолиния в 24 твэгах (ГВП (V_3, V_5-V_7)), но с разной общей массой ВП, а следовательно, и с его разной концентрацией в твэгах. Результаты расчетов показаны на рисунках 5 и 6.

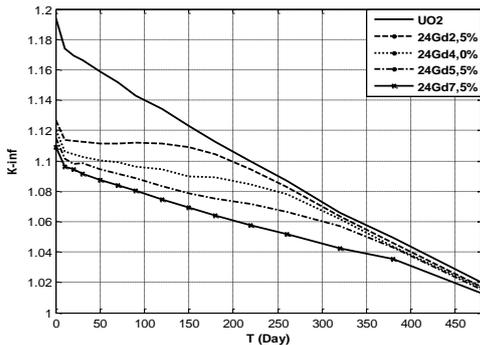


Рисунок 5 – Временная зависимость $K_{\text{инф}}$ полячейки для вариантов V_1, V_3, V_5-V_7 [$K_{\text{инф}}$ of poly-cell depending on burnup depth for variants V_1, V_3, V_5-V_7]

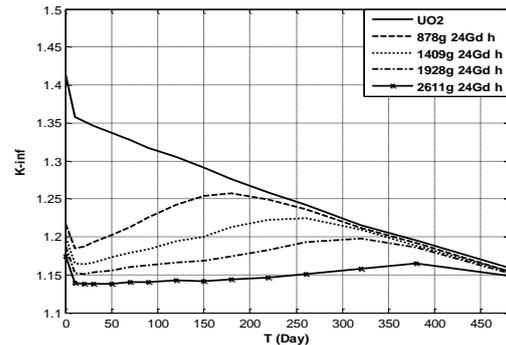


Рисунок 6 – Временная зависимость $K_{\text{инф}}$ ТВС в первой кампании для вариантов V_1, V_3, V_5-V_7 [$K_{\text{инф}}$ of FA in first campaign depending on burnup depth for variants V_1, V_3, V_5-V_7]

С повышением концентрации ВП в твэгах, блокировка потока тепловых нейтронов повышается, а скорость выгорания ВП на начальном этапе снижается при увеличении загрузки гадолиния в твэг. В результате увеличение загрузки гадолиния в твэг в этом случае не оправдано, так как максимум коэффициента размножения приходится на начало кампании, а его величина слабо снижается. Поэтому концентрация борного поглотителя будет слегка снижаться. Однако снижение реактивности за счет добавочной загрузки ВП не эквивалентны соответствующему увеличению его массы и концентрации. В частности уменьшение максимального коэффициента размножения нейтронов полячейки от базового состояния V_1 : $\Delta K_{\text{инф.макс.}} = 0,068; 0,074; 0,079$ и $0,085$ соответственно для вариантов V_3, V_5-V_7 , что в процентном отношении существенно меньше степени увеличения его массы.

Следовательно, для повышения влияния твэгов на характер изменения коэффициента размножения полячейки во времени необходимо снижать долю твэлов, приходящихся на один твэг, то есть повышать число твэгов в ТВС, и при этом повышать загрузку гадолиния в твэг. В этом случае начальное значение $K_{\infty}^{\text{TBC}}(0)$ будет снижаться, а постепенное разблокирование гадолиния в твэге приводит к медленному росту $K_{\infty}^{\text{TBC}}(t)$, что в совокупности приводит к существенному снижению максимального значения к $\bar{K}_{\infty}^{\text{POLY}}(t)$, то есть снижает максимальную концентрацию борного поглотителя в активной зоне реактора. На рисунках 7 и 8 предоставлены расчетные данные изменения $\bar{K}_{\infty}^{\text{POLY}}(t)$ и $K_{\infty}^{\text{TBC}}(t)$ при различном числе твэгов в ТВС (24, 30, 36 и 42) и различной загрузке ВП в твэг (890; 1762; 2644 и 3523 г Gd на ТВС) варианты (V_3, V_8-V_{10})).

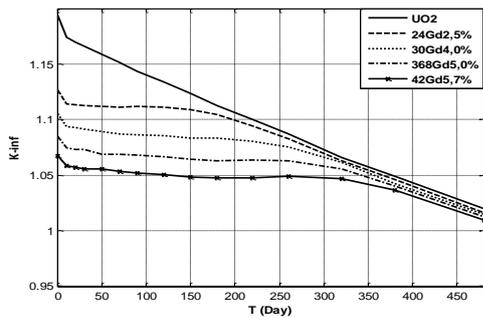


Рисунок 7 – Временная зависимость $K_{\text{инф}}$ полячейки для вариантов B_1, B_3, B_8-B_{10} [$K_{\text{инф}}$ of poly-cell depending on burnup depth for variants B_1, B_3, B_8-B_{10}]

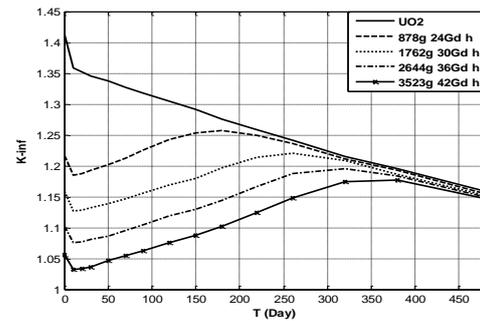


Рисунок 8 – Временная зависимость $K_{\text{инф}}$ ТВС в первом кампании для вариантов B_1, B_3, B_8-B_{10} [$K_{\text{инф}}$ of FA in first campaign depending on burnup depth for variants B_1, B_3, B_8-B_{10}]

Результаты расчетов показывают влияния обоих факторов на закон изменения со временем величины $\bar{K}_{\infty}^{\text{POLY}}(t)$. Во-первых, эта величина остается в течении большей части кампании примерно постоянной величиной, во-вторых, эта величина снижается по мере увеличения числа твэгов и загрузки гадолиния в твэг, однако при этом весь гадолий не успевает выгореть в течении кампании и, тем самым, снижает выгорание выгружаемого топлива. При этом запас реактивности на жидкостное регулирование для варианта B_{10} примерно в четыре раза меньше, чем для эталонного варианта без выгорающих поглотителей.

В следующем наборе вариантов (варианты $B_{11}-B_{14}$) было зафиксировано общее число твэгов в ТВС, но в каждом из них весь гадолий размещался гетерогенно в малой области по периферии центрального отверстия твэга, причем с повышением общей массы ВП толщина слоя гадолия также возрастала (0,11; 0,2; 0,29 и 0,48 мм соответственно). Расчетные зависимости коэффициентов размножения ТВС и полячейки из ТВС для этих вариантов приедены на рисунках 9 и 10.

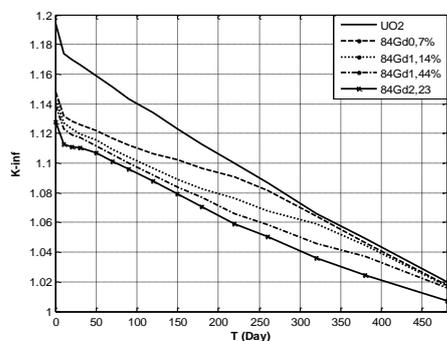


Рисунок 9 – Временная зависимость $K_{\text{инф}}$ полячейки для вариантов $B_1, B_{11}-B_{14}$ [$K_{\text{инф}}$ of poly-cell depending on burnup depth for variants $B_1, B_{11}-B_{14}$]

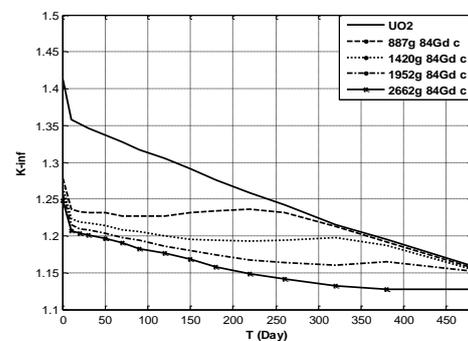


Рисунок 10 – Временная зависимость $K_{\text{инф}}$ ТВС в первой кампании для вариантов $B_1, B_{11}-B_{14}$ [$K_{\text{инф}}$ of FA in first campaign depending on burnup depth for variants $B_1, B_{11}-B_{14}$]

С повышением концентрации ВП в твэгах, блокировка потока тепловых нейтронов повышается, а скорость выгорания ВП уменьшается, что приводит к удлинению времени его выгорания. Отметим, что и в этом случае снижение начального запаса реактивности за счет применения ВП не адекватно соответствующему увеличению его массы и концентрации в твэге. Соответствующее снижение максимального коэффициента размножения нейтронов в полячейке относительно базового варианта без ВП (B_1) равны: $\Delta K_{\text{инф, макс.}} = 0,046; 0,051; 0,056$ и $0,066$ соответственно для вариантов $B_{11}-B_{14}$, что существенно меньше аналогичных значений для вариантов с гомогенным размещением ВП в твэгах.

В следующем наборе вариантов (B_{15} - B_{18}) изменялось как общее количество гадолиния в ТВС (887; 1775; 2662 и 3549 г Gd), так и общее число твэгов в ТВС (126, 180, 222 и 240), но при этом весь гадолиний в твэгах размещался гетерогенно, как и в предыдущем наборе вариантов, а с повышением количества ВП в ТВС возрастало и число твэгов. На рисунке 11 предоставлены результаты расчетов для этих вариантов.

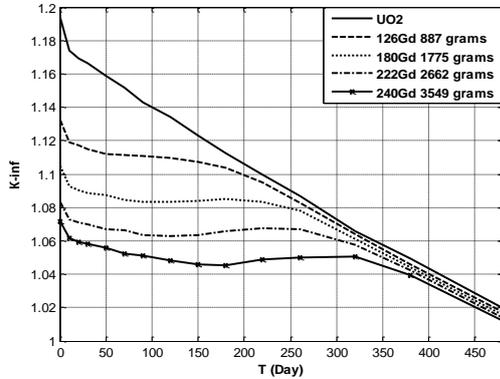


Рисунок 11а – Временная зависимость $K_{\text{инф}}$ поличейки для вариантов B_1, B_{15} - B_{18} [K_{inf} of poly-cell depending on burnup depth for variants B_1, B_{15} - B_{18}]

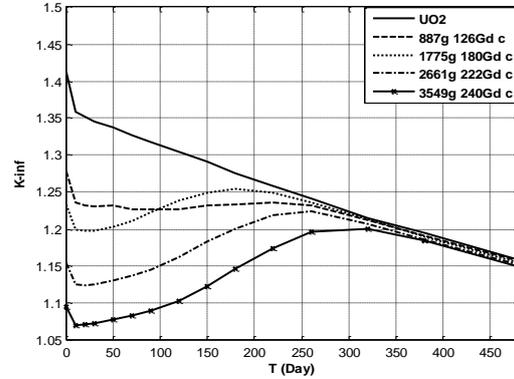


Рисунок 11б – Временная зависимость $K_{\text{инф}}$ ТВС в первой кампании для вариантов B_1, B_{15} - B_{18} [K_{inf} of FA in first campaign depending on burnup depth for variants B_1, B_{15} - B_{18}]

Сравнивая результаты на рисунках 10а и 10б с аналогичными на рисунках 7а и 7б, можно отметить практически полное совпадение. Во-первых, во всех рассматриваемых вариантах можно выделить большой интервал кампании, для которого величина коэффициента размножения слабо меняется с выгоранием. Во-вторых, с увеличением числа твэгов и одновременном повышении количества ВП в них, возрастает интервал слабого изменения коэффициента размножения поличейки и снижается значение этой величины. Тем самым снижается и остаточный запас реактивности на жидкостную систему компенсации, но с небольшой потерей в выгорании топлива. Необходимо отметить, что для получения таких результатов при гетерогенном размещении ВП требуется выделять существенно большее число твэгов. Для снижения общего числа твэгов в ТВС можно осуществить смешанное размещение ВП в них (варианты B_{19} и B_{20}). Результаты расчетов представлены на рисунках 12 и 13.

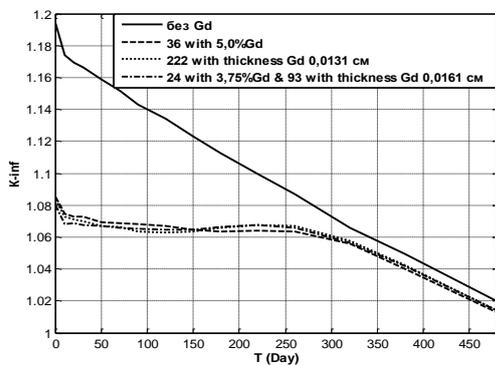


Рисунок 12 – Временная зависимость $K_{\text{инф}}$ поличейки для вариантов B_1, B_9, B_{17} и B_{19} [K_{inf} of poly-cell depending on burnup depth for variants B_1, B_9, B_{17} и B_{19}]

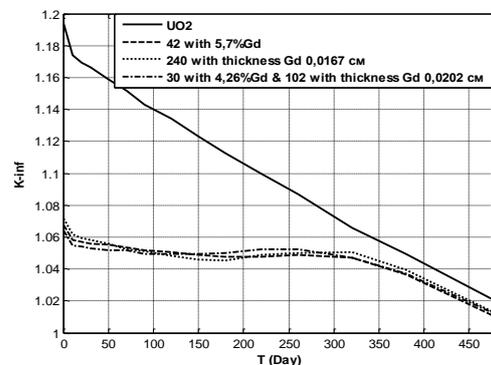


Рисунок 13 – Временная зависимость $K_{\text{инф}}$ поличейки для вариантов B_1, B_{10}, B_{18} и B_{20} [K_{inf} of poly-cell depending on burnup depth for variants B_1, B_{10}, B_{18} и B_{20}]

Совместное использование гомогенного (ГВП) и гетерогенного (ГТВП) ВП приводит к наибольшей компенсации реактивности в начале кампании. В таблице 2 представлено $\Delta K_{\text{инф. макс.}}$ и $\Delta K_{\text{(конец кампании)}}$ для вариантов В₉, В₁₀, В₁₇, В₁₈, В₁₉ и В₂₀.

Таблица 2 – $\Delta K_{\text{инф. макс.}}$ и $\Delta K_{\text{инф (в конце кампании)}}$ для вариантов В₉, В₁₀, В₁₇, В₁₈, В₁₉ и В₂₀ [$\Delta K_{\text{inf. max.}}$ и $\Delta K_{\text{inf in the end of campaign}}$ for variants В₉, В₁₀, В₁₇, В₁₈, В₁₉ и В₂₀]

Масса ВП (кг/ТВС)	2,65			3,55		
	ГВП	ГТВП	ГВП и ГТВП	ГВП	ГТВП	ГВП и ГТВП
Размещение ВП в ТВС						
$\Delta K_{\text{инф. макс.}}$	0,109	0,111	0,125	0,126	0,122	0,130
$\Delta K_{\text{(в конце кампании)}}$	0,008	0,006	0,006	0,010	0,008	0,008

Из таблицы 2 видно, что использование гомогенного (ГВП) и гетерогенного (ГТВП) размещение ВП приводит к снижению $K_{\text{инф. макс}}$ так и $K_{\text{(конец кампании)}}$, что означает существенное снижение применения жидкостной системы компенсации избыточной реактивности. В таблице 3 представлено $\Delta K_{\text{инф. макс.}}$ и $\Delta K_{\text{(конец кампании)}}$ для вариантов В₃, В₈, В₁₅ В₁₆.

Таблица 3 – $\Delta K_{\text{инф. макс.}}$ и $\Delta K_{\text{инф (в конце кампании)}}$ для варианты В₃, В₈, В₁₅ В₁₆ [$\Delta K_{\text{inf. max.}}$ и $\Delta K_{\text{inf in the end of campaign}}$ for variants В₃, В₈, В₁₅ В₁₆]

Масса ВП (кг)	0,88	0,89	1,76	1,78
Размещение ВП в ТВС	ГВП	ГТВП	ГВП	ГТВП
$\Delta K_{\text{инф. макс.}}$	0,068	0,063	0,089	0,089
$\Delta K_{\text{(в конце кампании)}}$	0,003	0,001	0,005	0,004

Выводы

В данной работе анализировалось влияние размещения ВП, число твэгов в ТВС и концентрации Gd в каждом твэге на коэффициент размножения нейтронов в полячейке для реактора ВВЭР с удлинёнными кампаниями. Снижение коэффициента размножения нейтронов уменьшает запас реактивности на компенсацию жидкостной системой. В результате резко снижается концентрация бора в теплоносителе, что благотворно сказывается на плотностном коэффициенте реактивности.

Результаты расчетов показывают, что снижение коэффициента размножения нейтронов происходит как за счет увеличения количества ВП в твэге, так и за счет увеличения числа твэгов. При этом, в течение большого интервала времени первой кампании сам коэффициент размножения нейтронов не меняется в процессе выгорания топлива. Это связано с тем фактом, что снижение реактивности реакторов в процессе выгорания топлива компенсируется ростом реактивности за счет выгорания ВП. В результате упрощается регулирование реактора оперативной системы органов регулирования.

Оказалось, что одинаковых результатов можно получить как с помощью ГВП, так и с помощью ГТВП, но ГВП требует для получения того же результата существенно меньшего числа твэгов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Burnable Absorbers – Burnable Poisons. URL: [tps://www.nuclear-power.net/nuclear-power-plant/nuclear-fuel/burnable-absorbers-burnable-poisons/](https://www.nuclear-power.net/nuclear-power-plant/nuclear-fuel/burnable-absorbers-burnable-poisons/) (accessed 21.01.2018).
2. Galperin A, Segev M, Radkowsky. A. Substitution of the Soluble Boron Reactivity Control System of a Pressurized Water Reactor by Gadolinium Burnable Poisons. Nucl. Technol., 75 (1986), P. 127-133. Published online: 10 May 2017. URL : <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.13182/NT86-A33855>.
3. Fiorini G. L, Gautier G. M, Bergamaschi Y. Feasibility Studies of a Soluble Boron-Free 900-MW (electric) PWR, Safety Systems: Consequences of the Partial or Total Elimination of Soluble Boron

- on Plant Safety and Plant Systems Architecture. Nucl. Technol., 127 (1999), pp. 239-258. Published online: 10 May 2017. URL : <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.13182/NT99-A2999>.
4. Jones R.C. Boron Dilution Reactivity Transients: A Regulatory Perspective. Proceedings of the OECD/NEA/CSNI Specialist Meeting on Boron Dilution Reactivity Transients, State College (PA), Oct 18–20 (1995). URL : https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:43012298.
 5. Стогов, Ю. В. Перспективные технологии использования оксидного уран-гадолиниевого топлива в легководных реакторах / Ю. В. Стогов, Н. И. Белоусов, В. И. Савандер [и др.] // Материалы XIV семинара по проблемам физики реакторов. – Москва : МИФИ, 2006. – С. 45-47.
 6. Balestieri D. A. STUDY OF UO_2/Gd_2O_3 COMPOSITE FUEL. IAEA-TECDOC-1036. Vienna (Austria).1998. P. 63-72.
 7. Ермолин, В. С. О размещении гадолиния в центральном отверстии твэлов водо-водяных реакторов / В. С. Ермолин, В. С. Окунев // Физика-технические проблемы ядерной энергетики. – Научная сессия МИФИ-2008. – С. 101-102.
 8. Бергельсон, Б. П. Глубина выгорания ядерного топлива ВВЭР с разными поглотителями / Б. П. Бергельсон [и др.] // Атомная энергия. – Т. 109, Вып. 4. – Октябрь, 2010. – С. 240-245.
 9. Абдельгафар Галахом, А. Исследование возможности использования сплава европия и Пирекса в качестве выгорающего поглотителя в PWR / А. Абдельгафар Галахом // Анналы атомной энергетики. – Т. 110. – Декабрь, 2017. – С. 1127-1133.
 10. Андрушенко, С. А. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 / С. А. Андрушенко [и др]. – Москва : Логос, 2010. – 604 с.
 11. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. – URL : <https://www.seogan.ru/np-082-07-pravila-yadernoiy-bezopasnosti-reaktornix-ustanovok-atomnix-stanciiy.html> (дата обращения: 16.4.2019).
 12. Varley F. Sears. Neutron scattering lengths and cross sections. Neutron News, Vol. 3, No. 3, 1992, pp. 26-37. Published online: 19 Aug 2006. Published online: 19 Aug 2006.
 13. Leppänen J. Serpent – a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. VTT Technical Research Centre of Finland. (June 18, 2015).
 14. Chadwick M.B. et al. ENDF/B-VII.1 nuclear data for science and technology: cross sections, covariances, fission product yields and decay data. Nucl. Data Sheets, 112 (2011), P. 2887-2996, 10.1016/j.nds.2011.11.002.

REFERENCES

- [1] Burnable Absorbers – Burnable Poisons. URL: [tps://www.nuclear-power.net/nuclear-power-plant/nuclear-fuel/burnable-absorbers-burnable-poisons/](https://www.nuclear-power.net/nuclear-power-plant/nuclear-fuel/burnable-absorbers-burnable-poisons/) (accessed 21.01.2018).
- [2] Galperin A, Segev M, Radkowsky. A. Substitution of the Soluble Boron Reactivity Control System of a Pressurized Water Reactor by Gadolinium Burnable Poisons. Nucl. Technol., 75 (1986), P. 127-133. Published online: 10 May 2017.
- [3] Fiorini G. L, Gautier G. M, Bergamaschi Y. Feasibility Studies of a Soluble Boron-Free 900-MW (electric) PWR, Safety Systems: Consequences of the Partial or Total Elimination of Soluble Boron on Plant Safety and Plant Systems Architecture. Nucl. Technol., 127 (1999), pp. 239-258. Published online: 10 May 2017.
- [4] Jones R.C. Boron Dilution Reactivity Transients: A Regulatory Perspective Proceedings of the OECD/NEA/CSNI Specialist Meeting on Boron Dilution Reactivity Transients, State College (PA), Oct 18–20 (1995).
- [5] Stogov Yu.V., Belousov N.I. Savander V.I. et al. Perspektivny`e tehnologii ispol`zovaniya oksidnogo uran-gadolinievogo topliva v legkovodny`x reaktorax [Promising Technologies for the Use of Uranium-Gadolinium Oxide Fuel in Light-Water Reactors]. Materialy` XIV seminar po problemam fiziki reaktorov [Proceedings of the XIV Seminar on Reactor Physics]. Moscow: MEFPhI. 2006. P. 45-47 (in Russian).
- [6] Balestieri D. A STUDY OF UO_2/Gd_2O_3 COMPOSITE FUEL. IAEA-TECDOC-1036. Vienna (Austria).1998. P. 63-72.
- [7] Ermolin V.S., Orunev V.S. O razmeshhenii gadoliniya v central`nom otverstii tve`lov vodovodyany`x reaktorov [Placement of Gadolinium in the Central Opening of Water-Water Reactor Fuel Rods]. Fiziko-texnicheskie problemy` yadernoj e`nergeti [Physical and Technical Problems of Nuclear Power Engineering]. Nauchnaya sessiya MIFI [Scientific Session of MEFPhI]. 2008. P. 101-102 (in Russian).
- [8] Bergelson B., Belonog V., Gerasimov A. et al. Glubina vy`goraniya yadernogo topliva VVE`R s razny`mi poglotitelyami [Depth of Burn-Up of VVER Nuclear Fuel with Different Absorbers].

- Atomnaya e`nergiya [Atomic Energy]. V. 109 Vol. 4 October 2010. P. 240-245 (in Russian).
- [9] Abdelghafar Galahom A. Issledovanie vozmozhnosti ispol'zovaniya splava evropiya i Pireksa v kachestve szhigaemogo poglotitelya v PWR [Study of Possibility of Europium and Pyrex Alloy Using as Burnable Absorber in PWR]. Annaly` yadernoj e`nergii [Annals of Nuclear Energy]. Volume 110. December 2017. P. 1127-1133 (in Russian).
- [10] Andrushenko S. A., Afrov A. M., Vasil'ev B. Yu., Generalov V. N., Kosourov, K. B., Yu. M. Semchenkov, V. F. Ukrainsev NPP. IEC c reaktorm tepa VVER-1000 [NPP with the Reactor WWER-1000]. Moscow: Logo, 2010. ISBN 978-5-98704-4 (in Russian).
- [11] Rules of Nuclear Safety of Nuclear Power Plants. URL: <https://www.seogan.ru/np-082-07-pravila-yadernoiy-bezopasnosti-reaktornix-ustanovok-atomnix-stanciiy.html>. (Accessed 16.4.2019). (in Russian).
- [12] Varley F. Sears. Neutron Scattering Lengths and Cross Sections. Neutron News, Vol. 3, No. 3, 1992, pp. 26-37. Published online: 19 Aug 2006.
- [13] Leppänen J. SERPENT – a Continuous-Energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation. Code. VTT Technical Research Centre of Finland. (June 18, 2015).
- [14] Chadwick M.B. et al. ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data. Nucl. Data Sheets, 112 (2011), P. 2887-2996, 10.1016/j.nds.2011.11.002.

Decrease the Volume of Boric Regulation of the Reactivity when Using the Burnable Absorber on the Basis of (GD2O3) in the Fuel Reactor WWER-1200

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

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

¹*ORCID iD: 0000-0003-3954-151X*

Wos Researher ID: Abu Sondos Mahmoud Abdelrahman

e-mail: MAbusondos@mephi.ru

²*ORCID iD: 0000-0003-3894-9396*

Wos Researher ID: Demin Victor Makcemovich

e-mail: VMDemin@mephi.ru

³*ORCID iD: 0000-0001-9309-5616*

Wos Researher ID: Savander Vladimir Igorovech

e-mail: VISavander@mephi.ru

Abstract – The paper considers various schemes of placement of the burnable absorbers (BAs) in the system of compensation of excess reactivity in the reactor of WWER type at the extended campaigns for the purpose of decrease in the maximum concentration of the boron absorber. On the basis of the variant optimization the influence of the method of placing the burnable absorber in the fuel rods (homogeneous and heterogeneous) and the amount of the placed burnable absorbers in them on the maximum value of the reactivity reserve compensated by the boron control system are analyzed.

Keywords: Burnable absorber (BAs), homogeneous (HBA) and heterogeneous (NHBA) burnable absorber, Serpent, VVER, fuel assemblies (FA), poly-cell, the maximum concentration of boric acid, the liquid system of regulation, excess reactivity, neutron multiplication factor (K_{∞}).

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.311.25.004.7:658.8

**ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ЛОГИСТИКА ДЕМОНТАЖНЫХ РАБОТ
ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ БЛОКОВ АТОМНЫХ
СТАНЦИЙ**

© 2019 А.И. Берела, С.А. Томилин, А.Г. Федотов

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

В представленной работе рассмотрены возможности использования производственной логистики в монтажных работах при выводе из эксплуатации блоков атомных электрических станций. Показано преимущество логистического подхода в организации монтажных работ, взаимосвязанных с последующими операциями обращения с продукцией монтажа.

Ключевые слова: вывод из эксплуатации, блок атомной электрической станции, производственная логистика, организация монтажных работ, радиационная безопасность.

Поступила в редакцию 03.09.2019

После доработки 05.09.2019

Принята к публикации 10.09.2019

В работе [1] отмечено, что разработка и реализация проектов вывода из эксплуатации блоков атомных электрических станций (АЭС) получают научно-исследовательскую, научно-практическую и нормативно-правовую поддержку в обосновании принимаемых организационно-управленческих, технических и технологических решений, эффективность которых может быть реальной только в условиях системного подхода к процессу вывода из эксплуатации в целом. Такая систематизация может быть проведена в рамках логистического подхода, зарекомендовавшего себя в качестве современного инструмента управления экономикой, производством, бизнесом.

Логистические процедуры повысят эффективность производственного процесса вывода блока АЭС из эксплуатации, но следует понимать, что логистическая концепция организации этого производства в целом имеет ограничения, так как ее преимущество в наибольшей мере проявляется в условиях диктата изменчивого рыночного спроса [2], а при выводе блока из эксплуатации действует традиционная плановая «жесткая» организация производства с минимальной количественной и качественной гибкостью.

Производственная логистика регулирует прохождение материального потока через производственное звено. Целью производственной логистики является оптимизация материальных потоков внутри предприятий, а в рассматриваемом случае – на блоке АЭС с производственным процессом монтажных работ.

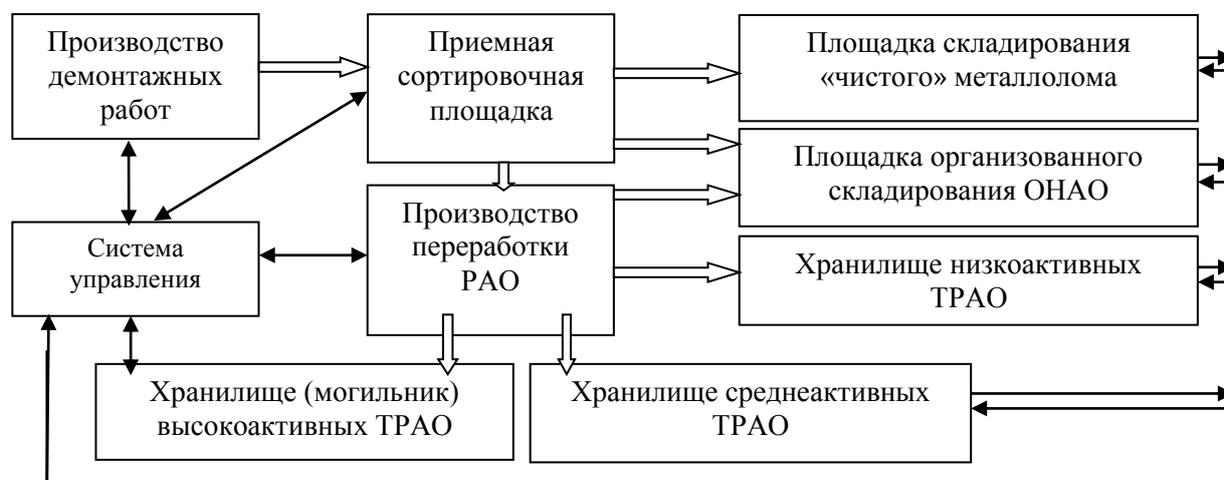
В отличие от традиционной логистики развитых материальных потоков в рассматриваемой ситуации отсутствует снабженческая составляющая, о чем было заявлено в работе [1]. Кроме того, участников такого производственного логистического процесса связывают внутрипроизводственные отношения, а не товарно-денежные, как в логистике на макроуровне. Характерные особенности присущи и распределительной логистике монтажных работ, она в малой мере ориентируется на спрос потребителя (только в части продажи «чистых» металлоотходов в качестве металлолома металлургическим предприятиям), а в большей

мере регулируется нормативными требованиями к хранению и захоронению радиоактивных отходов (РАО).

Таким образом, логистика производства монтажных работ при выводе из эксплуатации блоков АЭС будет несколько ограниченной по сравнению с ее традиционным применением, однако большинство функций и процедур логистики останутся действенными и полезными в управлении данными работами.

Характер управления материальным потоком в производственном процессе вывода из эксплуатации блока АЭС в соответствии с представлениями логистики [2] следует отнести к «толкающему» типу, когда объемы и темпы перемещения задаются начальным звеном логистической цепочки. В нашем случае это звено – монтаж оборудования (включая металлоконструкции) в помещениях блока.

Схема управления материальным потоком данного типа, представляемая в логистике [2] и адаптированная к условиям монтажных работ на блоке АЭС, показана на рисунке 1.



Условные обозначения: \Rightarrow – материальный поток; \longleftrightarrow – информационный поток

Рисунок 1 – Схема «толкающей» системы управления материальным и информационным потоками монтажных работ при выводе из эксплуатации блока АЭС [The scheme of the «pushing» system of management of material and information flows of dismantling works during the NPP unit decommissioning]

С позиций логистики [2] управление производственным процессом монтажных работ в условиях вывода из эксплуатации блока АЭС заключается в эффективном (с точки зрения снижения затрат и обеспечения нормативных требований к продукции работ) управлении материальными потоками в технологических процессах подготовки и проведения монтажных работ и в последующем обращении с демонтированными объектами. При этом большое значение имеют обычные логистические решения по календарному планированию, минимизации уровня незавершенного производства, сокращению длительности производственного цикла и т.п.

Эффективность логистики в управлении материальными потоками производства проявляется благодаря созданию системы его функционирования [2]. В системном подходе для достижения конечной цели осуществляется последовательный переход от общего к частному. Этапы формирования системы для производственного процесса вывода из эксплуатации блока АЭС выглядят следующим образом.

На *первом этапе* выделяются цели функционирования системы. Они заданы программой и проектом вывода блока АЭС из эксплуатации, а именно – площадка блока освобождается от радиоактивности и соответственно контролируется надзорными органами и переводится в состояние, пригодное для промышленного использования эксплуатирующей организацией.

На *втором этапе* на основании анализа указанной цели, требований нормативной документации к процессу вывода из эксплуатации и ресурсных ограничений [3-6]

формулируются условия, которым должна удовлетворять система. В нашем случае [6-9] система должна участвовать в обеспечении технологических процессов:

- демонтажа радиоактивного оборудования, металлических и строительных конструкций с приемлемыми дозовыми и ресурсными затратами;
- перемещения демонтированных объектов по блоку в рабочие зоны последующего обращения с ними;
- обращения с демонтированными объектами на площадке временного хранения, в подразделения переработки и кондиционирования РАО, на участке подготовки к утилизации в качестве металлолома и др.;
- обращения с вторичными радиоактивными отходами (сопутствующими основным операциям демонтажа и переработки РАО);
- перемещения переработанных и кондиционированных РАО, в том числе вторичных, в штатные и специальные места временного хранения и захоронения (при наличии последних) на площадке блока;
- организованного хранения подготовленных отходов повторного использования («чистых», условно «чистых», очень низкоактивных (ОНАО)).

На *третьем этапе* на базе этих условий формируются соответствующие подсистемы.

Четвертый этап. Синтез системы: анализ различных вариантов и выбор подсистем, организация их в единую систему. При этом используются критерии выбора, приоритетные в них – радиационная и экологическая безопасность при минимизации ресурсных затрат [9, 10].

Схема генерации системы интегральной логистики управления материальным потоком в производственном процессе демонтажных работ при выводе из эксплуатации блока АЭС показана на рисунке 2.

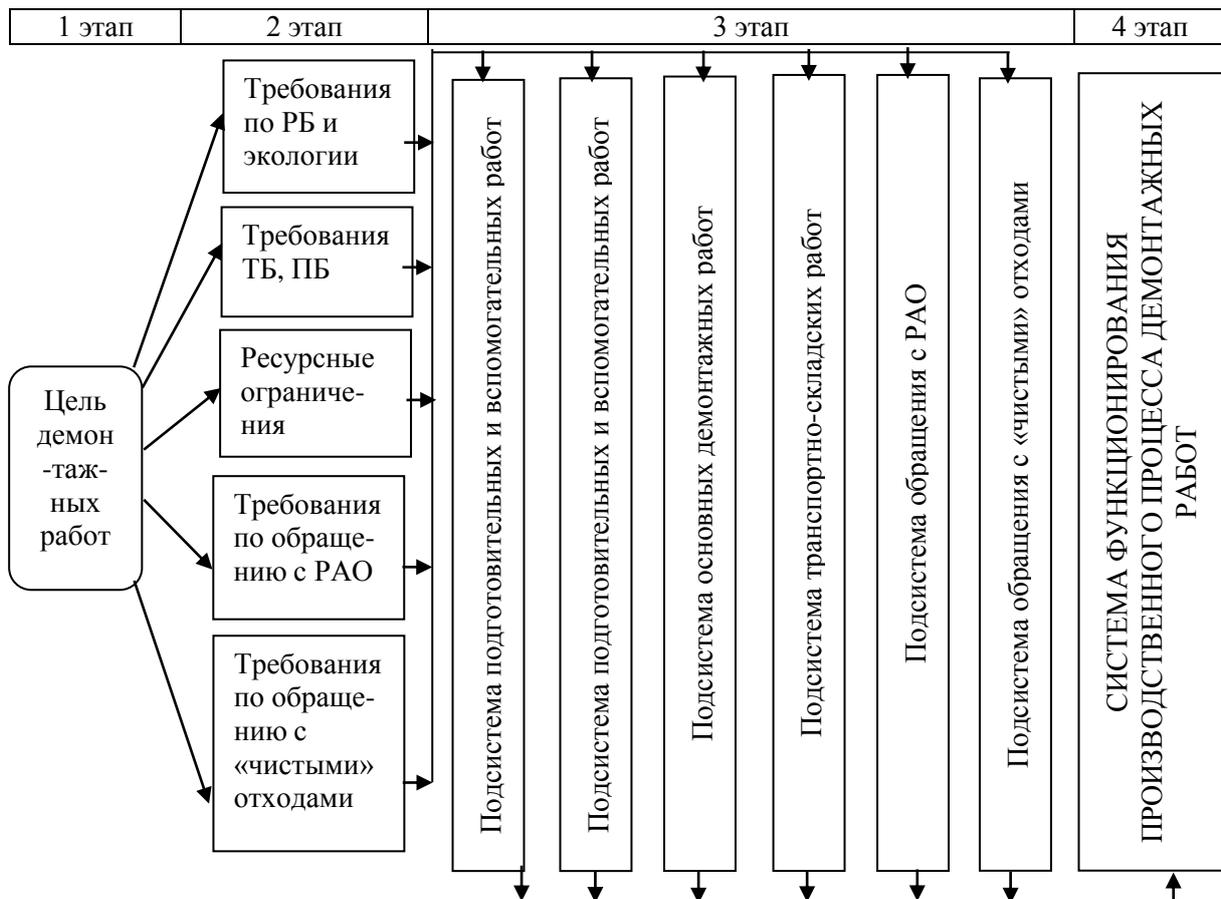


Рисунок 2 – Формирование системы функционирования производственного процесса демонтажных работ [Formation of functioning system of dismantling work production process]

Исходя из общей (интегральной) логистики управление материальным потоком производственного процесса монтажных работ в рамках сформированной системы осуществляется при взаимодействии логистических процедур в следующих областях:

- предмонтажных подготовительных и вспомогательных работ (с привлечением в поток вспомогательных материалов и объектов);
- непосредственно монтажных работ (с межоперационным материальным потоком);
- перемещений продукции монтажных работ из рабочих зон монтажа в рабочие зоны обращения с РАО, ОНАО и металлоломом из «чистых» отходов;
- промежуточного (временного) складирования продукции монтажа перед операциями последующего обращения с ними;
- обращения с РАО, ОНАО и металлоломом из «чистых» отходов (также с межоперационным материальным потоком);
- распределения продукции монтажа после операций обращения с ней по условным «потребителям», которые представляются временными хранилищами низко-, средне и высокоактивных РАО на блоке, региональными могильниками высокоактивных РАО (в перспективе), организованными на территории блока площадками хранения, перевалки и сбыта в качестве металлолома условно «чистых» и ОНАО;
- информационных потоков, сопровождающих материальные потоки и реализующих обратные связи в управлении потоками в производственном процессе монтажных работ.

В целом, объем, и номенклатура монтажных работ определяется проектом вывода из эксплуатации блока АЭС, а конкретное выполнение монтажа оборудования – набором типовых и единичных технологических процессов. В этот набор войдут и технологические процессы подготовительных предмонтажных работ. Кроме того, ряд операций подготовительного и вспомогательного характера будет непосредственно в составе типовых и единичных технологических процессов. Соответственно соображения по применению логистических процедур относятся к разработке структуры, оснащения, режимов и параметров технологических процессов, действующих в указанных областях, а в дальнейшем к их реализации.

Какие технологические и организационно-технические решения должны проходить эти процедуры?

1. Применение средств технологического оснащения (СТО) как основного, используемого при монтаже и фрагментации оборудования и металлоконструкций [11], так и вспомогательного – грузоподъемного, транспортно-перегрузочного (в границах рабочей зоны монтажа) и др. Сущность технологического решения в этом случае состоит в возможности выполнения технологических операций монтажа (основных и вспомогательных) с учетом влияния физико-механических свойств конструкционного материала на процесс разделки объектов, конфигурации объектов, способа их установки, технической характеристики применяемых грузоподъемных средств, размеров монтажных или дверных проемов в рабочей зоне, массогабаритных параметров демонтированных объектов (целиком или фрагментами) и т.д.

Прохождение логистической процедуры должно обеспечить движение материального потока в технологическом процессе монтажа объектов в рабочей зоне с применением выбранных основных и вспомогательных СТО: объекты монтажа перемещаются в рабочей зоне с размещением в контейнере, поддоне (или в мягкой упаковке) или без их применения с передачей через дверной или монтажный проем в транспортный коридор блока. При этом массогабаритные размеры объекта перемещения соответствуют техническим характеристикам применяемого штатного

или специального грузоподъемного и транспортного оборудования, а также габаритным параметрам путей перемещения в рабочей зоне. Кроме того массогабаритные параметры продукции демонтажа должны проходить процедуру определения соответствия условиям и требованиям их перемещения по транспортным маршрутам блока и операциям последующего обращения с ними (переработка и кондиционирование РАО, ОНАО, подготовка металлолома и др.). Демонтированная продукция должна маркироваться и соответственно идентифицироваться на всех этапах ее перемещения.

2. Обустройство дверных и монтажных проемов и, при необходимости, шлюзов на выходе из рабочих зон с высоким уровнем радиационного фона – обязательное условие функционирования транспортного потока демонтированных объектов. Такое обустройство в технологическом плане решает проблему передачи продукции демонтажа из рабочей зоны в зону ее дальнейшего перемещения по блоку в соответствии с технологией последующего обращения с ней. В логистическом плане данное обустройство должно формировать трассу транспортного потока на блоке, соответствующую архитектуре зданий блока, массогабаритным параметрам демонтированных объектов, применяемым техническим средствам перемещения, размещению на блоке рабочих зон последующего обращения с продукцией демонтажа.

3. Последовательность демонтажных работ по помещениям, в помещении и на конкретном объекте определяет их рациональный ход с учетом влияния таких факторов, как минимизация дозовых затрат, техническая возможность выполнения демонтажной операции и перемещения продукции демонтажа, применение производительного механизированного и роботизированного технологического оборудования и др. [6–9].

Анализ принимаемого технологического решения по последовательности демонтажных работ с использованием логистических процедур необходим для управления транспортным потоком продукции демонтажных работ в рабочей зоне: трассирования маршрутов ее перемещения с выходом из рабочей зоны, применения соответствующего условиям трасс технических средства перемещения. Последовательность демонтажных работ не должна создавать препятствия последующего использования штатных или специальных средств перемещения, коридоров, проемов блока на маршруте к рабочим зонам дальнейшего обращения с продукцией демонтажа. Таким образом, гармонизируется технология перемещения в рабочей зоне демонтажа и за ее пределами в здании блока.

4. Согласование (гармонизация) выходных массогабаритных и радиационно-физических параметров демонтированных объектов с операциями их упаковки, контейнеризации, перемещения, промежуточного хранения, переработки и др. Данная логистическая процедура естественно вписывается в процесс принятия соответствующих технологических решений, она отсекает те из них, которые приведут к усложнению управления транспортным потоком, например, введению дополнительных операций перегрузки с заменой транспортных средств, использованию вспомогательных площадей для такого рода операций и т.д.

5. Трассы перемещения продукции демонтажа в зданиях и на территории блока. Технологические и логистические аспекты решений по трассам перемещения взаимосвязаны, сами решения принимаются при разработке проекта вывода из эксплуатации блока АЭС. Трассы должны в максимальной мере организовываться в соответствии с архитектурой блока и его оснащением штатной грузоподъемной и транспортной техникой [12]. Это позволит минимизировать ресурсные расходы, в том числе временные, на организацию и выполнение материальных потоков. Доработки на трассе строительного характера (расширение существующих и обустройство новых проемов, усиление строительных конструкций и т.д.) должны быть логистически

обоснованы. Изменения по трассе в техническом плане (в части замены штатных или применения дополнительных грузоподъемных и транспортных средств) ограничены прочностью строительных конструкций.

6. Применение тары в производственном материальном потоке. Если в логистике применение тары в материальных потоках рассматривается с позиции удобства, технологичности и сохранности перемещения продукции, а также стимулирования спроса на нее за счет привлекательности упаковки, то в производственном процессе монтажных работ использование тары необходимо для повышения уровня технологичности материального потока и, главным образом, для обеспечения радиационной и экологической безопасности. Таким образом, использование логистических процедур в вопросе применения тары (упаковки) в материальном потоке продукции монтажных работ ограничено факторами обеспечения безопасности.

7. Некоторые организационно-технические решения в ходе подготовки проекта вывода из эксплуатации блока АЭС попадают в область типовой для логистики задачи – «сделать или купить». Такая задача возникает, например, при выборе исполнителей работ – в рамках персонала АЭС или со стороны, при использовании СТО – ранее применяемых в ремонтных работах на блоке или специальных и закупаемых, при организации рабочих зон обращения с продукцией монтажа – в зданиях блока или специально построенных и т.д.

Таким образом, повышению эффективности производственного процесса монтажных работ при выводе из эксплуатации блока АЭС способствует применение логистических процедур управления образующимися материальными потоками. Логистические процедуры совершенствуют технологический процесс монтажа оборудования, металлических и строительных конструкций в части согласования темпа и объема материального потока с основными операциями (демонтаж, перемещение, переработка отходов и др.), массогабаритных, радиационных и других характеристик объектов материального потока с применяемыми СТО монтажа, перемещения, переработки отходов, габаритными параметрами проемов, коридоров и других составляющих трассы транспортного потока и т.д. Исходя из представленных выше соображений по применению логистических процедур, их следует внедрить в процессе разработки проекта вывода из эксплуатации блока АЭС, в первую очередь – технологической части проекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Берела, А. И.* Возможности логистики в обеспечении эффективности и радиационной безопасности производственного процесса вывода из эксплуатации блоков атомных станций / А. И. Берела, С. А. Томилин, А. Г. Федотов // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 2 (31). – С. 68.
2. *Гаджинский, А. М.* Логистика / А. М. Гаджинский. – Москва : Издательско-торговая корпорация «Дашков и К^о», 2009. – 484 с.
3. СП 2.6.1.2205-07. Санитарные правила «Обеспечение радиационной безопасности при выводе из эксплуатации блока атомной станции». – Москва, 2007.
4. НП-012-16. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правила обеспечения безопасности при выводе из эксплуатации блока атомной станции». – Москва : Федеральная служба по экологическому, техническому и атомному надзору, 2016.
5. *Томилин, С. А.* Особенности проектирования монтажа оборудования блоков атомных станций с учетом нормативного регулирования их вывода из эксплуатации / С. А. Томилин, А. И. Берела, Н. Н. Подрезов, А. Г. Федотов // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 1(22). – С. 59-67.
6. *Берела, А. И.* Адаптация технологии монтажа оборудования выводимых из эксплуатации блоков АЭС к требованиям радиационной безопасности / А. И. Берела, Б. К. Былкин, С. А. Томилин, А. Г. Федотов // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 2 (29). – URL : ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2416 (дата обращения: 30.01.2019).

7. *Берела, А. И.* Разработка технологических процессов демонтажа оборудования при выводе из эксплуатации атомных станций / А. И. Берела, А. Г. Федотов, С. А. Томилин, Б. К. Былкин // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 2 (25). – URL : ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1734 (дата обращения: 12.02.2019).
8. *Берела, А. И.* Выбор значений параметров технологического процесса демонтажа оборудования блоков АЭС, выводимых из эксплуатации / А. И. Берела, Б. К. Былкин, С. А. Томилин, А. Г. Федотов // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – № 3(8). – С. 60-64.
9. *Берела, А. И.* Оптимизационные аспекты проектирования технологического процесса демонтажа оборудования при выводе из эксплуатации блока атомной станции / А. И. Берела, Б. К. Былкин, В. А. Шапошников // Тяжелое машиностроение. – 2004. – № 6. – С. 9-14.
10. *Берела, А. И.* Основные принципы разработки конкурентоспособных проектов демонтажных работ при выводе из эксплуатации блоков атомных станций / А. И. Берела, С. А. Томилин, А. Г. Федотов // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2015. – Т. 5. – № 4 (26). – С. 191-195.
11. *Берела, А. И.* Технологическое оборудование, применяемое в работах по выводу из эксплуатации блоков АЭС / А. И. Берела, А. Г. Федотов, С. А. Томилин // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – № 1(6). – С. 58-66.
12. *Берела, А. И.* Анализ и представление среды действия в системе проектирования технологии демонтажа оборудования при выводе из эксплуатации блока АЭС / А. И. Берела, Б. К. Былкин, С. А. Томилин, А. Г. Федотов // Глобальная ядерная безопасность. – 2014. – № 1 (10). – С. 25-31.

REFERENCES

- [1] Berela A.I., Tomilin S.A., Fedotov A.G. Vozmozhnosti logistiki v obespechenii e`ffektivnosti i radiacionnoj bezopasnosti proizvodstvennogo processa vy`voda iz e`kspluatacii blokov atomny`x stancij [Logistics Capabilities in Ensuring the Efficiency and Radiation Safety of the Production Process of Decommissioning of Nuclear Power Units]. Global`naya yadernaya bezopasnost` [Global Nuclear Safety]. 2019. № 2 (31). P. 68. (in Russian).
- [2] Gadzhinskij, A.M. Logistika [Logistics: Textbook]. Moscow. Izdatel`sko-torgovaya korporaciya «Dashkov i K°» [Dashkov and K° Publishing and Trade Corporation]. 2009. 484 p. (in Russian).
- [3] SP 2.6.1.2205-07. Sanitarny`e pravila «Obespechenie radiacionnoj bezopasnosti pri vy`vode iz e`kspluatacii bloka atomnoj stancii» [Sanitary Rules «Ensuring Radiation Safety during Decommissioning of Nuclear Power Plant Unit»]. Moscow. 2007. (in Russian).
- [4] NP-012-16. Federal`ny`e normy` i pravila v oblasti ispol`zovaniya atomnoj e`nergii «Pravila obespecheniya bezopasnosti pri vy`vode iz e`kspluatacii bloka atomnoj stancii» [Federal Rules and Regulations in the Field of Atomic Energy Use «Rules for Ensuring Safety during Decommissioning of Nuclear Power Plant Unit»]. Moscow. Federal`naya sluzhba po e`kologicheskomu, texnicheskomu i atomnomu nadzoru [Federal Service for Environmental, Technical and Nuclear Supervision]. 2016 (in Russian).
- [5] Tomilin S.A., Berela A.I., Podrezov N.N., Fedotov A.G. Osobennosti proektirovaniya demontazha oborudovaniya blokov atomny`x stancij s uchetom normativnogo regulirovaniya ix vy`voda iz e`kspluatacii [Features of the Design of Dismantling the Equipment of Nuclear Power Units Taking into Account the Regulatory Regulation of their Decommissioning]. Global`naya yadernaya bezopasnost` [Global Nuclear Safety]. 2017. № 1(22). P. 59-67 (in Russian).
- [6] Berela A.I., By`lkin B.K., Tomilin S.A., Fedotov A.G. Adaptaciya texnologii demontazha oborudovaniya vy`vodimy`x iz e`kspluatacii blokov AE`S k trebovaniyam radiacionnoj bezopasnosti [Adaptation of the Technology of Dismantling the Equipment of Decommissioned NPP Units to the Requirements of Radiation Safety]. Inzhenerny`j vestnik Dona [Engineering Herald of the Don]. 2014. № 2 (29). URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2416 (in Russian).
- [7] Berela A.I., Fedotov A.G., Tomilin S.A., By`lkin B.K. Razrabotka texnologicheskix processov demontazha oborudovaniya pri vy`vode iz e`kspluatacii atomny`x stancij [Development of Technological Processes for Dismantling Equipment during Decommissioning of Nuclear Power Plants]. Inzhenerny`j vestnik Dona [Engineering Herald of the Don]. 2013. № 2 (25). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1734 (in Russian).
- [8] Berela A.I., By`lkin B.K., Tomilin S.A., Fedotov A.G. Vy`bor znachenij parametrov texnologicheskogo processa demontazha oborudovaniya blokov AE`S, vy`vodimy`x iz e`kspluatacii [Choice of the Values of the Parameters of the Technological Process of Dismantling the Equipment

- of Decommissioned NPP Units]. *Global'naya yadernaya bezopasnost'* [Global Nuclear Safety]. 2013. № 3(8). P. 60-64 (in Russian).
- [9] Berela A.I., Bylkin B.K., Shaposhnikov V.A. Optimizacionny'e aspekty` proektirovaniya tekhnologicheskogo processa demontazha oborudovaniya pri vy`vode iz e`kspluatacii bloka atomnoj stancii [Optimization Aspects of the Design Process of Dismantling Equipment during Decommissioning of Nuclear Power Plant Unit]. *Tyazheloe mashinostroenie* [Heavy Engineering]. 2004. №6. P. 9-14 (in Russian).
- [10] Berela A.I., Tomilin S.A., Fedotov A.G. Osnovny'e principy` razrabotki konkurentosposobny`x proektov demontazhny`x rabot pri vy`vode iz e`kspluatacii blokov atomny`x stancij [Basic Principles for the Development of Competitive Dismantling Projects during Decommissioning of Nuclear Power Units]. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta MAMI* [News of Moscow State Technical University MAMI]. 2015. Vol. 5. № 4 (26). P. 191-195 (in Russian).
- [11] Berela A.I., Fedotov A.G., Tomilin S.A. Tekhnologicheskoe oborudovanie, primenyaemoe v rabotax po vy`vodu iz e`kspluatacii blokov AE`S [Technological Equipment Used in the Decommissioning of NPP Units]. *Global'naya yadernaya bezopasnost'* [Global Nuclear Safety]. 2013. № 1(6). P. 58-66 (in Russian).
- [12] Berela A.I., Bylkin B.K., Tomilin S.A., Fedotov A.G. Analiz i predstavlenie srede` dejstviya v sisteme proektirovaniya tekhnologii demontazha oborudovaniya pri vy`vode iz e`kspluatacii bloka AE`S [Analysis and Representation of the Environment of Action in the Design System of Dismantling Equipment during Decommissioning of the NPP Unit]. *Global'naya yadernaya bezopasnost'* [Global Nuclear Safety]. 2014. № 1(10). P. 25-31(in Russian).

Production Logistics of Dismantling Works in the NPP Unit Decommissioning

A.I. Berela¹, S.A. Tomilin², A.G. Fedotov³

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

¹*e-mail: berelaleks@yandex.ru*

²*ORCID iD: 0000-0001-8661-8386*

Wos Researher ID: G-3465-2017

e-mail: SATomilin@mephi.ru

³*e-mail: AGFedotov@mephi.ru*

Abstract – The article considers the possibilities of using production logic in dismantling works during the decommissioning of nuclear power plant units. The advantage of the logistic approach in the organization of dismantling works interconnected with the subsequent operations of handling dismantling products is shown.

Keywords: decommissioning, nuclear power plant unit, production logistics, organization of dismantling works, radiation safety.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.181

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПАРОГЕНЕРИРУЮЩЕГО
ТРАКТА В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРАХ АЭС**

© 2019 М.Н.С. Ансах (Гана)*, Н.Н. Подрезов**

*Томский политехнический университет, Томск, Россия

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

В статье дан краткий обзор влияния различных схем сепарации в горизонтальных парогенераторах (ПГВ) АЭС на качество пара, производимого в паровом тракте для подачи в турбину. Дальнейший рост тепловой мощности ПГВ без существенного увеличения габаритных размеров определяется «удержанием» сепарационной характеристики ПГВ в пределах, заданных сухостью отбираемого пара. В этом направлении ключевыми оптимизациями горизонтальных ПГВ следует считать отказ от жалюзийных сепараторов в пользу пароприемных дырчатых листов с переменной перфорацией и разработку новой теплогидравлической схемы для двухпетлевого проекта ВВЭР-ТОИ.

Ключевые слова: парогенератор, сепарация пара, энергоблок ВВЭР, влажность пара, сепарация гравитационная, погруженный дырчатый лист, пароприемный дырчатый лист, технико-экономические показатели.

Поступила в редакцию 24.12.2018

После доработки 03.07.2019

Принята к публикации 05.07.2019

The SG is one of the main objects of increasing thermal power to increase steam production, the pressure of the generated steam and the electric power of the nuclear power plant accordingly. A distinctive feature of all existing and projected SG for WWER-based reactor installations is the horizontal layout of heat transfer U-shaped tubes connecting the «hot» and «cold» collectors of the heat exchanger. The second feature of horizontal SG is the use of gravity-precipitation separation for steam drying during single-movement coolant. There is always a large thermal irregularity due to low temperature pressures along the coolant moving between the collectors for all standard PGV structures of WWER reactor units. As a result, various thermal loads lead to the formation of «hot» and «cold» zones, which cause distortion of the level of the evaporation mirror, the vapor content and the vapor velocity.

These factors adversely affect the separation characteristics of PGV and, accordingly, on the quality of steam drawn to the turbine, limiting the steam capacity and thermal power SG. Until recently, it was believed that PGV-1000MKP or PGV-1000MKO horizontal steam generators reached near-limit thermal power at a level slightly above 800 MW, which, of course, is not enough to compete with vertical-type steam generators used in foreign projects. A further increase in the capacity of Russian SG is limited by the geometrical dimensions and possibilities of the thermal-hydraulic scheme of steam separation.

Potential customers have recently been paying increasing attention to comparative technical and economic indicators, the investment attractiveness of NPP projects, including Russian. When analyzing some modern foreign projects with water-cooled reactors, there is a tendency to a decrease in the number of loops of the reactor facility (RU) and an increase in

the unit power of the SG. These are the projects AP-1000 (Westinghouse), the Korean projects APR-1400 and APR+ (KEPCO), EPR-1600 (AREVA) and some others.

Attention in this work is focused on a comparative analysis of the parameters of the thermal-hydraulic circuits of horizontal steam generators of different WWER projects from the point of view of increasing their steam production while observing the standards for the quality of separated steam supplied to the turbine.

The coolant having a pressure of the first circuit, passes through U-shaped coils, heats the feed water of the second circuit of the SG, which is under less pressure. The water around the tubes boils and the steam-water mixture enters under the perforated sheet, forming a steam pad. Wet vapor from the evaporation mirror above the perforated sheet moves upwards, losing moisture to the required conditions and then through separating devices (in old projects) or throttling (in new ones) enters the vapor receiving channel of the collector.

The criterion for the quality of the generated steam is the separation characteristic, which is the dependence of steam moisture on the height of the vapor volume and the speed of the steam from the evaporation mirror, figure 1.

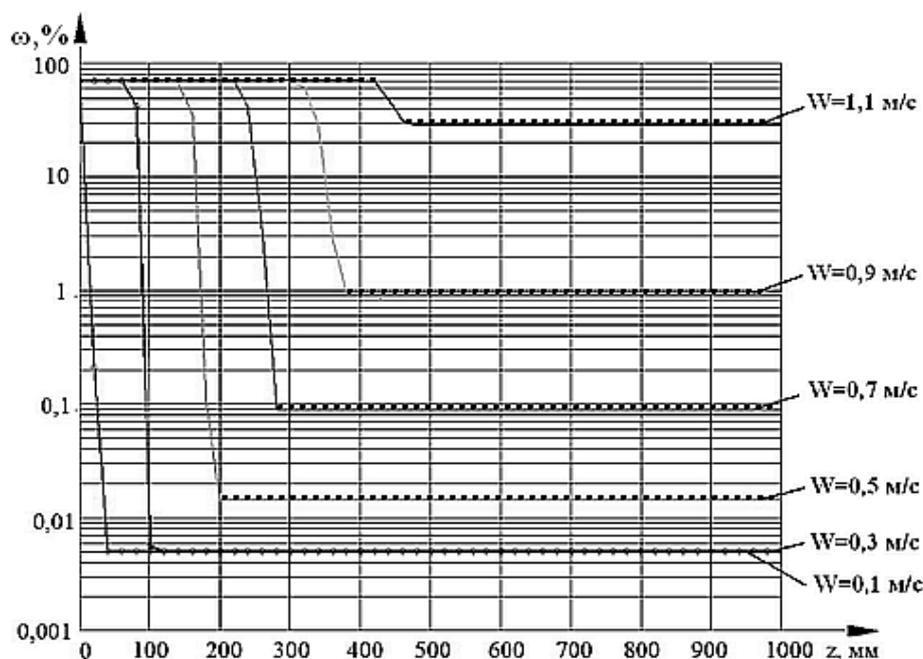


Figure 1 – Dependence of steam moisture (ω) in the area gravitational-precipitation separation the height of the vapor volume (z) and the speed (W) of movement of the steam [1]

From the analysis of Figure 1 it follows that the limiting speed of steam, at which gravitational-precipitation separation is possible, should be considered as 0,7 m/s. At higher steam speeds, the transported moisture loss exceeds the allowable 0,2%.

It should be noted that the improvement of the separation characteristics of the horizontal steam generators of the NPP did not happen immediately. Initially, as the main scheme was used with a louver separator, figure 2a. However, in the early 2000s, it became clear that more powerful NPP units required an increase in the reserve for steam production, the expansion of the allowable range of change in the level of the evaporation mirror.

At the same time was discovered the inefficient use of louver in SG with preliminary gravity separation above the bubble layer in conditions of natural convection two-phase working medium [2]. Then it actually turned away from two-step steam separation in favor of a single-stage by replacing the louver on the perforated shield plate, figure 2b. Louver separators are used only in WWER-440 while in WWER-1000 and 1200 they are all replaced by a ceiling plate shields.

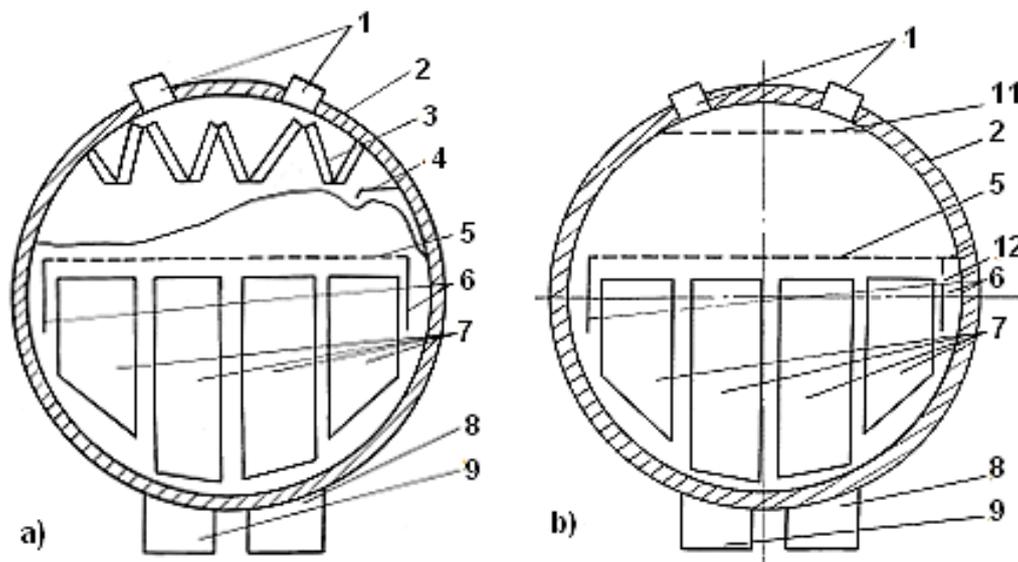


Figure 2 – Separation scheme of the horizontal steam generators: a) with louver separator; b) with shield receiving steam (1 – pipes of the steam; 2 – casing; 3 – louver separator; 4 – reflector; 5 – submerged perforated sheet (SPS); 6 – bends of SPS; 7 – packages of heat exchanging tubes; 8 – «hot» collector; 9 – «cold» collector; 11 – steam-receiving perforated sheet; 12 – overflow windows)

When replacing the louver scheme with a scheme with a ceiling shield receiving steam, the height of the steam volume increased from 750 mm to 1200...1250 mm. This led to an improvement in the separation characteristics, which has been repeatedly proven by full-scale tests [3]. Because of this, it became possible:

- to increase the coefficient reserve for steam capacity;
- to increase the safety of operation of the second circuit of NPP due to the increase in the allowable range of changes in the level of the boiler water;
- to reduce steam humidity at the output of the steam generator while increasing the steam limiting speed to 0.6...0.7 m / s at a steam humidity of 0.2%.

The conditions of control and repair of SG internals are also significantly improved.

Increasing the heating capacity of the steam generator PGV-1000MKP to 800 MW in steam capacity 1602 t/h, table 1, in the V-392M (WWER-1200) project required further improvement of the separation scheme. In the V-320 (WWER-1000) project for with a uniform perforation degree of 7.3%, the residual unevenness of the evaporation mirror load was 1.25, and the local vapor velocity on the evaporation mirror reached a value of about 0.43 m/s at maximum power [4].

The extension of the steam generator PGV-1000 MKO (WWER-TOI) by 1 meter slightly increases the hydraulic resistance of the steam generator, reduces the evaporation mirror load, but it is more difficult to equalize the evaporation mirror load and organize a uniform steam extraction [5].

In order to reduce the local speed of the output steam from the evaporation surface and reduce the moisture content of the steam leaving the steam line, a submersible perforated sheet with a variable degree of perforation has been developed and introduced into SG. This will reduce the uneven steam load on the evaporative mirror in the horizontal section SG.

For even more powerful PGV-1500 (1062.5 MW) and PGV-1600 (1087.5 MW) with economizer, together with separation schemes, other elements of the steam generating path will be improved. In particular, instead of 10 tubes of steam to PGV-1000MKP, PGV-1500 they will remain two [6], and SG 1600 – single [7].

Table 1 – Some Technical and Economic Indicators of SG

Indicators	Models: Steam Generator / Reactor						
	440	1000M	1000МКР	1000МКО	1500	1650	SNP 140
	WWE R-440	WWR -1000	WWR - 1200	WWR - TOI	WWR -1500	WWR -TOI	CAP- 1400
Technical							
Number of SG per reactor	6	4	4	4	4	2	2
Thermal power, MW	229	750	800	825	1500	1650	2029
Steam production t / h	450	913	1602	1652	2150	3205	~3900
The inner body diameter / length, m	<u>3.2</u> 13.0	<u>4.0</u> 13,84	<u>4.2</u> 13,82	<u>4.2</u> 14,82	<u>4.8</u> 15,62	<u>4.8</u> 16,59	<u>4.655</u> 24
Mass (without supports), t	145	315	337	353	530	513	807
Number of tubes	5536	11000	10978	11000	15120	19156	12606
Heat exchange surface, m ²	2577	6115	6105	6660	9490	12343	14666
Inlet / outlet coolant temperature, °C	<u>301</u> 266	<u>320</u> 289	<u>329</u> 298	<u>328,8</u> 297,2	<u>330</u> 297,6		<u>324</u> 284
Coolant flow rate, m ³ /h	7100	21200	21400	22000	26971	44000	21642
Hydraulic resistance in I contour, MPa	-	не более 0,13				0,61	~1,1
Economic							
Block efficiency, %	32,1	33,3	37,5	37,9	37,5	37,5	37,0
SG efficiency, %	97- 99						
Specific steam production per hour (by weight)	3,10	2.90	4.75	4.68	4.06	6.25	~ 4.83

Designing horizontal SG for new competitive Russian NPP units without the ability to increase the primary coolant flow rate can be viewed as the process of creating heat exchangers with low temperature pressure or low specific heat load of the SG heat exchange surface. Accordingly, when designing, the issues of providing heat removal with a steam generator will become more significant, and its separation characteristics will be ensured due to the low specific load of the heat exchange surface and the evaporation mirror. The new steam generator PGV-1650 for the two-loop reactor WWR-TOI is a good example of increasing the thermal power of an SG due to a fundamental change in the thermal-hydraulic separation scheme [5].

For distribution of the coolant through the pipes, collectors are used, but unlike the traditional layout, they are arranged not vertically, but horizontally. From the horizontal distributing collector, the coolant is distributed to the upper half of the tube bundle, moves along pipes along the hull SG, cooling down at the same time. At the bottom of the steam generator, the pipes unfold by 180°, and the coolant moves to the collecting manifold in the lower part of the heat exchange beam. As a result, in each cross section of the steam generator, the beam is filled with upper conditionally hot and lower conditionally cold pipes. Due to this event, the vaporization along the length of the steam generator remains almost constant, that made it possible to abandon the submerged perforated sheet. The reduction of local heat loads in NG allows to increase its heat output up to 1,650 MW, which significantly increases the competitiveness of a horizontal steam generator compared to a vertical one [8, 9, 10], for example, SNP 140 Chinese project CAP-1400 [11, 12], table 1. Currently, their

specific technical and economic indicators, especially in relation to the size-weight factor, are becoming more and more important in the race of SG, table 1.

CONCLUSIONS

1. Thermal capacity of a horizontal SG of 800 MW is not limit and can be significantly increased with the elimination of the main drawback of the horizontal steam generator is significant irregularity of the heat load on the area of the evaporation mirror.

2. In the steam generator PGV-1650 for the two-loop WWER-TOI, the heat output is increased more than 2 times from existing horizontal steam generators, without significant complication of the design and the preservation of single-stage gravity-precipitation separation of steam.

3. Under the conditions of equality of thermal efficiency of modern steam generators of NPPs, their specific technical and economic indicators are crucial relative to the size-weight factor.

REFERENCES

- [1] Lakhov D.A., Kharchenko S.A. About the limit power of a horizontal steam generator Materials of the conference: report, 16th International scientific and technical conference of young specialists of OKB «GIDROPRESS». 26-27 March, 2014. Podolsk: OKB «Gidropress», Russia, 2014. URL : <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2012/autorun/index-ru.htm> (in Russian).
- [2] Nigmatulin B.T., Ageev A.G., Blinkov V.N., Vasiliev V. R., Korol'kov B.M., Dragunov Yu.G., Trunov N.B., Nekrasov A.V., Ilyushin V.F.. Experimental study, testing and implementation of new separation scheme for steam generators of nuclear power units with WWER-1000. Nuclear power plant. 2003. № 3. P. 16-22 (in Russian).
- [3] Petrov A.Yu. Modernization of separation equipment in the steam generators of NPP with WWER. PhD Thesis in Engineering 05.14.03. Moscow, 2005. 105 p. (in Russian).
- [4] Trunov N.B., Lukasevich B.I., Sotskov V.V., Kharchenko S.A. The past and the future of horizontal steam generators. Materials of a seminar: report, 7-th international seminar on horizontal steam generators. 3-5 October, 2006. Podolsk: OKB «Gidropress», Russia, 2010. URL : <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/seminar7/seminar7/section1.htm> (in Russian).
- [5] Lakhov D.A., Kharchenko S.A. Horizontal steam generator. Problems of increasing power and possible solutions. Materials of the conference: report, 14-th International scientific and technical conference of young specialists of OKB «GIDROPRESS». 21-22 March, 2012. Podolsk: OKB «Gidropress», Russia, 2012. URL : <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2012/autorun/index-ru.htm> (in Russian).
- [6] Volkov V.Y., Golibrodo L.A., Krutikov A.A., Kudryavtsev O.V., Lahov D.A., Nadinsky Y.N., Nikolaeva A.V., Skibin A.P., Sotskov V.V. Optimization of perforated distribution plate in steam generator PGV-1000MKO using CFD. Transactions of 9-th International Scientific and Technical Conference «Safety Assurance of NPP with WWER», 19-22 May, 2015. Podolsk: OKB «Gidropress», Russia, 2015 URL : <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2015/autorun/section2-en.htm> (in Russian).
- [7] Emelyanov I.D. Definition of levelling ability of submerged perforated sheet variable perforation to increase the capacity of NPP with WWER PhD Thesis in Engineering: 05.14.03. Moscow, 2015. 200 p. (in Russian).
- [8] Lyakishev S.L., Trunov N.B., Sotskov V.V. Analysis of steam flow in the steam collector of PGV-1000MKP SG. Materials of a seminar: report, 8-th international seminar on horizontal steam generators. 19-21 May, 2010. Podolsk: OKB «Gidropress». Russia. 2010. URL : <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/seminar8/seminar8/section3-ru.htm> (in Russian).
- [9] Gritsenko A.A. New horizontal steam generator for two-loop RU high power. Materials of the conference: report, 16-th International scientific and technical conference of young specialists of OKB «GIDROPRESS», 26-27 March, 2014. Podolsk: OKB «Gidropress», Russia, 2014. URL : <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2012/autorun/index-ru.htm> (in Russian).
- [10] Trunov N.B., Lukasevich B.I., Veselov D.O., Dragunov Yu.G. Steam generators – horizontal or vertical (which type should be used in nuclear power plants with VVER?). Translated from Atomnaya Énergiya. Vol. 105. No. 3. P. 127-135, September, 2008. Original article submitted July 25, 2008. Springer Science+Business Media, Inc. (in Russian).

- [11] In the world: Interview with the head of the development team of the technical project of the power unit with the CAP1400 reactor Fang Zhou. Atomic Expert: electron. version of the journal. 2016. № 7 (49). P. 41-43. URL : <http://atomicexpert.com/atomicexpert7-2016> (in Russian).
- [12] Reactor CAP1400. AtomInfo.RU: electron. period. ed. 03/05/2015. URL: <http://www.atominfo.ru/newsk/r0389.htm> (in Russian).

Comparative Analysis of Generating Path in Horizontal NPP Steam Generators

Michael Nii Sanka Ansah ^{*1} (Ghana), N.N. Podrezov ^{**2}

**National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk Polytechnic University, TPU, 30, Lenin Avenue, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia 634050*

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

¹ORCID iD: 0000-0002-0314-2413

WoS Researcher ID: G-3892-2017

e-mail: michaelansah67@gmail.com

²ORCID iD: 0000-0001-8957-8682

WoS Researcher ID: C-5465-2018

e-mail: VITkafMPM@mephi.ru

Abstract – The article provides a brief overview of the effect of various separation schemes in horizontal steam generators (PGV) of nuclear power plants on the quality of steam produced in the steam path for supply to the turbine. A further increase in the thermal power of the PGV without a significant increase in the overall dimensions is determined by the «retention» of the separation characteristic of the PGV within the limits specified by the dryness of the steam taken. In this direction the key optimization of horizontal PGV should be considered the rejection of louvered separators in favor of steam-receiving perforated sheets with variable perforation and the development of a new thermal-hydraulic scheme for the two-loop WWER-TOI project.

Keywords: steam generator (SG), steam separation, WWER units, steam humidity, evaporation mirror, gravity separation, submerged perforated sheet (SPS), steam-receiving perforated sheet, technical and economic indicators.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.384.039

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ЧАСТОТ АКУСТИЧЕСКИХ
СТОЯЧИХ ВОЛН, ГЕНЕРИРУЕМЫХ РЕАКТОРАМИ ВВЭР**

© 2019 К.Н. Проскуряков, С.К. Белова, А.В. Аникеев, И. Афшар

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*

Проведено сопоставление результатов расчета частот акустических стоячих волн с автоспектральными плотностями мощности сигналов датчиков пульсаций давления для сложных комбинаций акустических элементов 1-го контура АЭС с ВВЭР-440. Получено удовлетворительное соответствие результатов расчета частот акустических стоячих волн с данными измерений. Приведен новый подход к методу расчёта частот акустических стоячих волн комбинационных акустических контуров в системе теплоносителя в ВВЭР-440. Впервые исследован реактор с трубопроводами холодной и горячей ниток как сложный резонатор Гельмгольца. Установлено, что частоты акустических стоячих волн зависят от числа учитываемых в расчете акустических элементов, содержащихся в подводящих и отводящих трубопроводах.

Ключевые слова: стоячие волны, АСПМ, акустическая масса, акустическая податливость, верификация.

Поступила в редакцию 26.06.2019

После доработки 05.07.2019

Принята к публикации 10.07.2019

Первый контур водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) представляет собой разветвленную гидравлическую систему трубопроводов, содержащую элементы со сложной гидродинамической системой потока. Имеется целый ряд элементов, которые могут вызвать нестабильность и колебания потока теплоносителя, например, зона входных патрубков реактора и опускного кольцевого канала между корпусом реактора и оболочкой шахты. При входе в реактор поток изменяет свое направление на 90° , одновременно уменьшается скорость теплоносителя. Сочетание диффузионного эффекта с резким поворотом способствует турбулизации и образованию отрывов потока. Гидродинамические возмущения на входе в активную зону вызывает резкий поворот потока на 180° внизу реактора в совокупности со значительным увеличением пульсаций скорости и давления. Пульсации и колебания давления теплоносителя в трубопроводах, вызывая вибрации последних, оказывают непосредственное влияние на прочность трубопроводов, их опор и связанного с ними технологического оборудования [1, 2]. Гидравлические системы АЭС представляют собой цепь сочлененных между собой элементов различной сложности, которые в целом образуют звукопровод [3]. Наиболее простыми в таких системах являются трубные устройства. Поскольку они выполняются с различными элементами – расширениями, камерами, отводными каналами, дросселями, арматурой и т.д., общая теория распространения звука в этих устройствах сложна [4, 5]. Однако, если неоднородности звукопровода меньше длины волны, их можно рассматривать как акустические элементы с сосредоточенными параметрами, а весь звукопровод, как состоящий из отрезков волноводов, имеющих участки с сосредоточенными параметрами [3-6].

Как любой конструктивный элемент, обладающий массой и упругостью, теплоноситель в первом контуре имеет собственные частоты колебаний, которые могут резонировать с источниками гидродинамических возмущений при совпадении частот или проявляться, как менее выраженные линии в спектре, если резонансная (собственная) частота теплоносителя отличается от частот источников гидродинамических возмущений. Таким образом, уменьшение пульсаций давления и скорости теплоносителя является одним из необходимых критериев предотвращения или уменьшения вибраций.

Теплоноситель в основном оборудовании первого контура АЭС представляет собой колебательные акустические системы. В этих системах распределены акустическая масса m_{ac} и акустическая податливость C_a . На рисунке 1 представлена упрощенная электрическая система замещения акустических элементов первого контура двухконтурной АЭС [3].

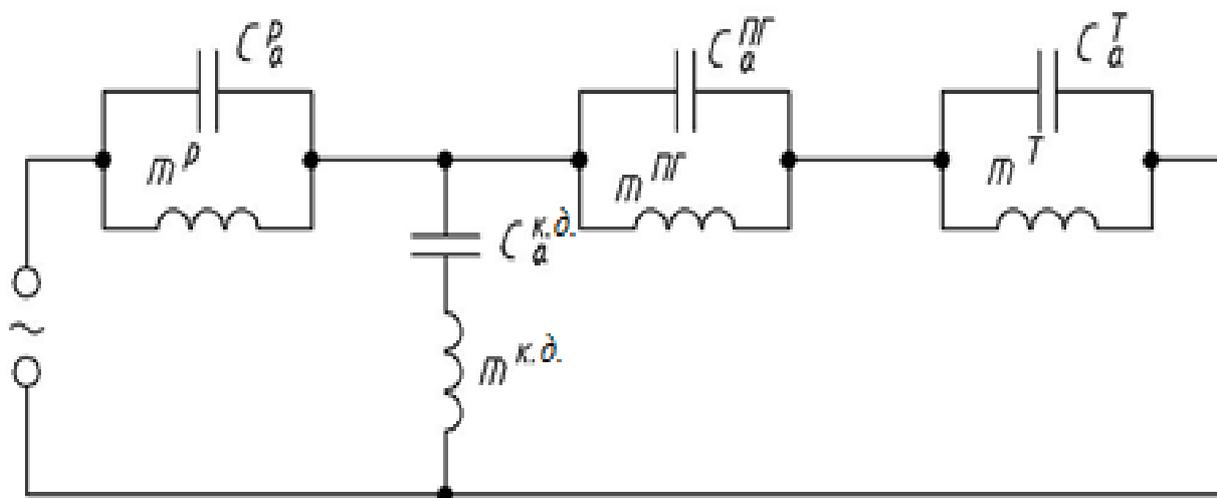


Рисунок 1 – Упрощенная электрическая схема замещения акустических элементов первого контура АЭС с реактором ВВЭР (p – реактор; $к.д.$ – компенсатор давления; T – трубопровод; $ПГ$ – парогенератор)
[Simplified electrical circuit diagram of replacement of acoustic elements of the primary circuit of nuclear power plants with WWER reactors. Codes: p – reactor; $к.д.$ – pressurizer; T – pipe; $ПГ$ – steam generator]

Эта эквивалентная схема замещения необходима для расчета собственных частот колебаний теплоносителя в одной петле первого контура АЭС с реактором типа ВВЭР.

В работе [7] показано, что система акустических элементов обладает свойствами, которые не могут быть получены простой суперпозицией акустических свойств составляющих ее элементов. Созданная К.Н. Проскуряковым акустическая модель ядерного реактора показывает, что таким новым системным свойством как способность усиления и гашения определенных частот колебаний в оборудовании первого контура, обладает комбинация ядерного реактора с присоединенными к нему трубопроводами, образующими горячую и холодную нитки. Согласно этой модели система образованная реактором и подключенными к нему петлями теплоносителя представляет собой резонатор Гельмгольца, генерирующий одновременно несколько акустических стоячих волн (АСВ).

В литературе имеются сведения о создании таких резонаторов, выполняющих роль глушителя автомобиля, усилителя колебаний органного типа, усилителя колебаний в радиотехнических устройствах. Однако, сведений о возможности представлении ядерного реактора в качестве сложного многоструйного с неравномерно подогреваемой, перекачиваемой насосом текучей средой в виде резонатора Гельмгольца в литературе не имеется.

Количество возбужденных волн в такой модели соответствует количеству неоднородностей в контуре. Определение собственных частот колебаний давления теплоносителя (СЧКДТ) проведено по формуле Томсона [8] согласно методу электроакустических аналогий [3, 4, 5, 6]. Акустическая масса m_{ac} присоединенных к реактору трубопроводов и акустическая податливость C_p объема реактора, позволяют определить собственные частоты колебаний давления теплоносителя (СЧКДТ) генерируемых этой акустической системой по формуле Томсона (1):

$$f_{ac} = \frac{1}{2\pi \cdot m_{ac} \cdot C_p} \quad 1$$

где f_{ac} – расчетная частота собственных колебаний системы, Гц;

m_{ac} – акустическая масса акустической системы, зависит от количества учитываемых в расчете акустических элементов присоединенных трубопроводов, формулы (2)-(3):

$$\frac{1}{m_{ac}} = 6 \frac{1}{m_{комбХ}} + \frac{1}{m_{комбГ}}, \quad (2)$$

$$C_p = \frac{V_p}{\rho_{ср} \cdot a_{ср}^2}, \quad \frac{M^4 \cdot c^2}{кг} \quad (3)$$

где скорость звука с учётом деформации металла и сжимаемости воды рассчитывается по формуле (4)[9]:

$$a_{ср} = \frac{1}{\rho_{ср} \frac{D_p}{E_m \cdot \delta} + \frac{1}{\rho_{ср} \cdot c_{ср}^2}} \quad (4)$$

где $D_p = \frac{4 \cdot S}{\pi}$ – диаметр реактора;

V_p – объём реактора, м³;

$\rho_{ср}$ – значение средней по объёму реактора плотности воды, кг/м³;

$c_{ср}$ – значение средней по объёму реактора скорости звука в воде, м/с;

δ – толщина стенки корпуса реактора, м;

E_m – объемный модуль упругости материала;

$E_{ж} = \rho_{ж} \cdot c^2$ – объемный модуль упругости жидкости;

$m_{комб}$ – акустическая масса комбинированной системы трубопроводов;

C_p – акустическая податливость теплоносителя в объёме реактора при средних значениях давления и температуры в реакторе.

Путем применения акустической модели реактора (с подключенными трубопроводами холодной и горячей ниток, как сложного резонатора Гельмгольца), по приведенной выше методике, получены результаты вариантных расчетов частот АСВ для комбинаций числа участков (и соответственно длин подсоединенных трубопроводов горячей и холодной ниток), в различных режимах пуска энергоблока.

В таблице 1 приведены результаты расчёта частот (Гц) АСВ в номинальном режиме работы энергоблока ВВЭР-440, для трех моделей акустической массы, соответствующих пяти вариантам количества учитываемых в расчетной модели акустических элементов труб. Разработанная акустическая схема первого контура показана на рисунке 2. Приведенная схема включает основные элементы 1-го контура АЭС с ВВЭР-440.

Таблица 1 – Результаты расчета частот (Гц) АСВ в участках акустической схемы первого контура [Results of ASW frequency (Hz) calculation in sections of the first circuit acoustic diagram]

Участки	Для пяти вариантов длин труб				
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
Параметры номинального режима: T = 280,5 °C, P = 12,27 МПа					
P+6вх+6вых	19,51	10,38	9,58	7,66	23,11
P+6вх	13,90	8,25	8,25	6,56	13,90
P+6вых	14,17	6,30	5,25	3,93	19,54

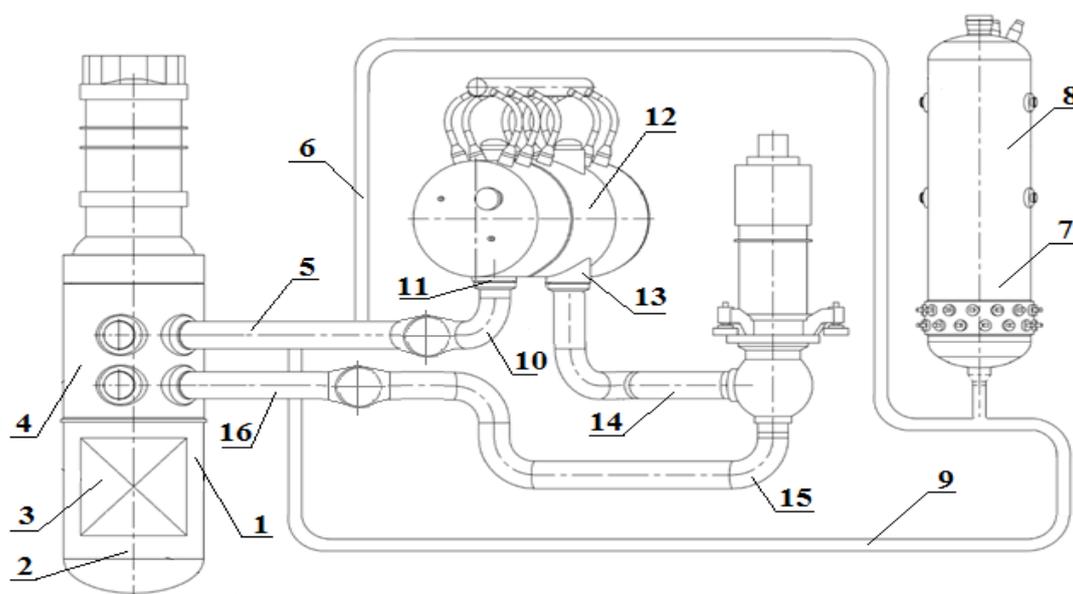


Рисунок 2 – Акустическая схема АЭС с ВВЭР – 440 3 блока НВАЭС: 1 – опускной участок реактора; 2 - пространство под активной зоной; 3 – активная зона; 4 – пространство над активной зоной; 5 – участок ГЦК от реактора до ГЗЗ; 6 – дыхательный трубопровод от горячей нитки до компенсатора давления; 7 – компенсатор давления (вода); 8 – компенсатор давления (пар); 9 – дыхательный трубопровод от компенсатора давления до горячей нитки; 10 – участок горячей нитки главного циркуляционного контура (ГЦК) от главной запорной задвижки (ГЗЗ) до горячего коллектора; 11 – горячий коллектор ПГ; 12 – теплообменная поверхность ПГ; 13 – холодный коллектор ПГ; 14 – участок от холодного коллектора ПГ до ГЦН; 15 – участок холодной нитки ГЦК от ГЦН до ГЗЗ; 16 – участок холодной нитки ГЦК от ГЗЗ до входа в опускной участок реактора [Acoustic circuit of NPP with WVER – 440 of Novovoronezh NPP unit 3:1 - downcomer section of the reactor; 2 – the space below the reactor core; 3 - reactor core; 4 – the space above the reactor core; 5 – phase main circulation circuit reactor to main loop isolation valve; 6 – respiratory tubing from a hot thread pressurizer; 7 – pressurizer (volume of water); 8 – pressurizer (volume of steam); 9 – respiratory pipeline to pressurizer from a hot leg; 10 – a section hot thread main circulation circuit (MCC) from main loop isolation valve (MLIV) to hot manifold; 11 – hot manifold steam-generator; 12 – heat exchange surface of steam-generator; 13 – cold manifold steam-generator; 14 – the plot from the cold reservoir of steam-generator to main loop isolation valve; 15 – plot of the cold thread of main circulation circuit from main circulating pump to main loop isolation valve; 16 – land of the cold thread of main circulation circuit from main loop isolation valve to the entrance of the standpipe portion of the reactor]

В настоящее время на Нововоронежской АЭС успешно используется система контроля вибрации основного оборудования SUS.1 Размещение датчиков системы SUS для ВВЭР-440 показано на рисунке 3.

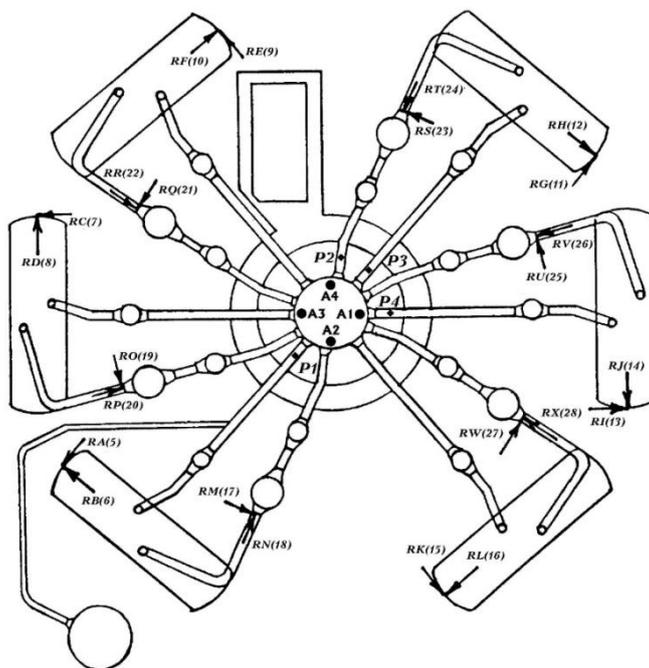


Рисунок 3 – Размещение датчиков системы SUS для ВВЭР-440 [Placement of SUS sensors for WVER-440]

Система SUS в режимах нормальной эксплуатации реакторной установки (РУ) обеспечивает вибродиагностику основного оборудования и трубопроводов РУ (реактор с ВКУ и ТВС, ГЦТ, ПГ) с целью раннего выявления аномальных вибрационных состояний этого оборудования, вызванных изменением условий закрепления жесткостных характеристик опор или возрастанием гидродинамических нагрузок со стороны теплоносителя первого контура РУ ВВЭР-440. Эксплуатация системы во время переходных процессов, а также при пуске и останове энергоблока по инструкции не допускается.

Система является информационной (по результатам ее работы не происходит каких-либо оперативных переключений). Система предназначена для периодических измерений. Принцип действия системы заключается в том, что в начале каждой кампании производится контроль вибросостояния оборудования, в результате чего оператор получает спектры механических колебаний компонентов первого контура – такие спектры считаются базовыми. В течение работы энергоблока с периодичностью не менее 2 раз за кампанию производятся текущие измерения, и на основании сравнения их с базовыми значениями, делается вывод о возможности выхода из строя каких-либо элементов контролируемого оборудования.

Первичными преобразователями в системе SUS служат:

- датчики абсолютных перемещений (ДАП) – 4 шт.;
- датчики относительных перемещений (ДОП) – 24 шт.;
- датчики пульсаций давления (ДПД) – 4 шт.

Внедрены и используются в виде программных пакетов: программа для автоматической отбраковки спектров; программа для автоматического выделения пиков в вибрационных спектрах [10]. Автоспектральная плотность мощности (АСПМ) сигналов от ДПД для номинального режима представлены на рисунке 4.

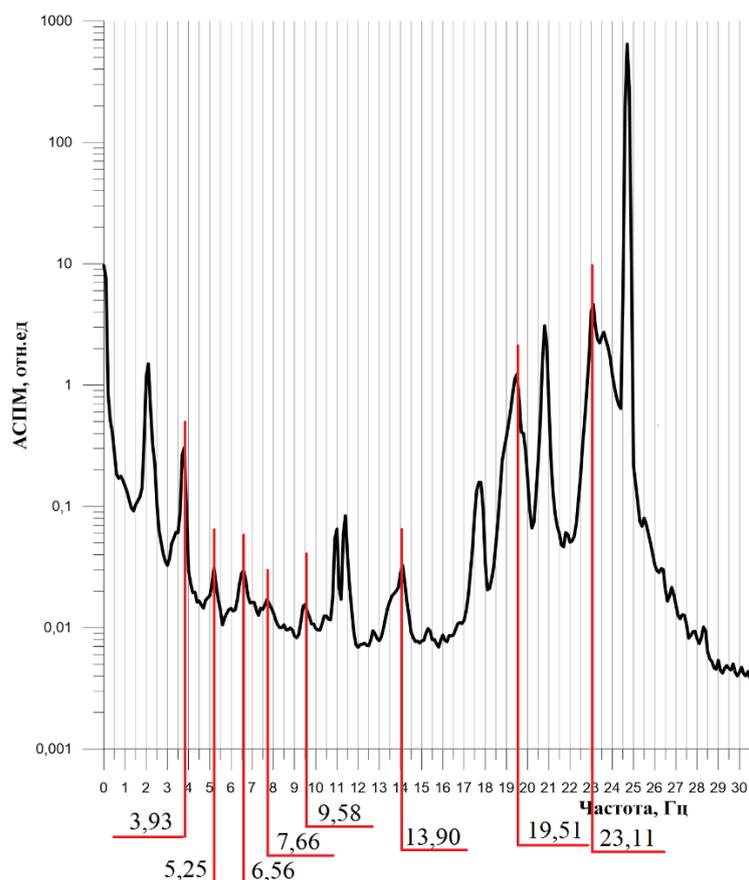


Рисунок 4 – АСПМ ВВЭР-440 режим номинальный [Auto spectral power density of WWER-440 at nominal conditions]

Из рисунков видно, что АСПМ имеет пилообразный характер, причем большинство из доминирующих пиков в публикациях, посвященных идентификации источников возбуждения АСВ, до настоящего времени не интерпретированы [2, 11]. Результаты расчета частоты АСВ по принятой методике сопоставлены с данными измерений вибраций основного оборудования первого контура приведенными в [2] для ВВЭР-440. Результаты сопоставления:

- 0,6 Гц – соответствует АСВ компенсатора давления;
- 0,6-0,625 Гц – глобальное колебание давления в 1 контуре;
- 0,875-1,25 Гц – горизонтальные колебания всей петли;
- 3,6-5,3 Гц – совместные колебания корпуса и шахты по круговой траектории;
- 6,0 Гц – 1-я петлевая АСВ;
- 6,2 Гц – изгибные колебания пучка ТВЭЛ;
- 5,3-7,3 Гц – совместные колебания корпуса и шахты по круговой траектории (в противоположном направлении);
- 8,0-8,375 Гц – акустическая стоячая волна – 2 (с пучностью на вертикальной оси реактора);
- 8,2 Гц – изгибные колебания пучка ТВЭЛ;
- 10-12 Гц – маятниковые колебания корпуса реактора;
- 11,0-11,5 Гц – мультиплет (круговые колебания корпуса реактора и внутрикорпусных устройств);
- 11,9 Гц – вращательные колебания пучка ТВЭЛ;
- 13,5-14,0 Гц – маятниковые колебания корпуса реактора;
- 14-18 Гц – вертикальные колебания корпуса реактора;

- 18,75-19,125 Гц – вертикальные колебания корпуса реактора;
- 20,1 Гц – собственная частота пучка ТВЭЛ, колебания изгибные,;
- 2,4 Гц – собственная частота пучка ТВЭЛ, колебания изгибные;
- 23,125-23,375 Гц – вертикальные колебания корпуса реактора;
- 24,625-24,75 Гц – оборотная частота ГЦН;
- 24,8 Гц – собственная частота пучка ТВЭЛ + чехол, колебания изгибные.

Большинство заметных пиков обусловлено колебаниями давления теплоносителя в отдельных элементах акустической схемы и в комбинациях акустических элементов, принятых в расчёте. Совпадение полученной расчётной частоты АСВ с результатами измерения частоты вибраций ТВС [2] позволяет сделать вывод о том, что причиной возникновения колебаний ТВС являются самовозбуждающиеся АСВ.

Результаты расчета частот АСВ в первом контуре ВВЭР-440 являются характеристикой его индивидуального акустического поля, которое не может быть создано в лабораторных условиях. По этой причине в указанных ниже работах [12-16] исследовано не влияние АСВ на вибрации ТВС, а влияние вихрей, представляющих собой локальные, а не системные причины вибраций.

В работе [12] для моделирования сложных трехмерных процессов в активных зонах реакторов проведены теплогидравлические и гидродинамические расчеты с использованием CFD (computational fluid dynamics) – кодов.

Для исследования были использованы сетки с 7, 16 и 60 миллионами элементов. Показано, что точный по времени расчет CFD может быть использован для определения нагрузок на ТВЭЛ для последующего динамического анализа. В работе [13] представлены результаты моделирования больших вихрей с использованием пучков топлива CANDU и вихревых явлений. В работе [14] использовались методы моделирования крупных вихрей (LES- Large Eddy Simulation) для определения зависящих от времени сил, действующих на пучок стержней. В работе [15] рассмотрено взаимодействие между потоком и конструкцией в упрощенных ТВС, показано, что потеря устойчивости стержня происходит при больших осевых скоростях потока. В работе [16] представлены данные об индуцированной потоком вибрации и связанного с ней фреттингового износа в пучке тепловыделяющих элементов. Для вычисления потоков с высоким числом Рейнольдса использован теплогидравлический код Hydra-TN, разработанный в Лос-Аламосской Национальной лаборатории. Запатентованный код VITRAN, разработанный компанией Вестингауз, применен для того чтобы выполнить нелинейные вычисления структурной динамики и скорости износа.

Однако, выяснилось, что ТВС и ТВЭЛ, разработанные для PWR, оказались непригодными для использования в ВВЭР, а ТВС и ТВЭЛ, разработанные для ВВЭР, не годятся для использования в реакторах PWR. Причины этого заключаются в том, что каждая модификация реакторов имеет свое индивидуальное акустическое поле, в котором вибрации ТВС удовлетворяют требованию не превышения допустимого уровня. Для обеспечения выполнения этого требования в ином акустическом поле необходимо соответствующее изменение конструкции ТВС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод и алгоритм расчета АСВ обладает следующими преимуществами в сравнении с существующими:

- имеет ясный физический смысл и механическую интерпретацию;
- результаты расчета частот пятнадцати АСВ с удовлетворительной для практических целей точностью подтверждаются результатами измерения;
- не требует разработки сложного программного обеспечения и привлечения профессионалов в области информационных технологий;

- результаты расчетно-теоретического анализа АСВ, генерируемых реактором с присоединенными холодными и горячими участками петель первого контура АЭС с ВВЭР-440, верифицированы данными измерений на 3 энергоблоке Нововоронежской АЭС.
- полученные результаты подтверждают работоспособность акустической модели реактора с трубопроводами холодной и горячей ниток, согласно которой реактор представляет собой систему резонаторов Гельмгольца.

Авторы статьи выражают глубокую благодарность руководству НВАЭС директору В.П. Поварову, главному инженеру А.И. Федорову, заместителю директора В.А. Шварову и начальнику отдела диагностики М.Т. Слепову за организацию и проведение специально разработанной расширенной программы экспериментов, необходимых для верификации разработанных НИУ «МЭИ» акустических моделей АЭС с реактором ВВЭР-440.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самарин, А. А. Вибрации трубопроводов энергетических установок и методы их устранения / А. А. Самарин. – Москва : Энергия, 1979. – 288 с.
2. Аркадов, Г. В. Виброшумовая диагностика ВВЭР / Г. В. Аркадов, В. И. Павелко, А. И. Усанов // Москва : Энергоатомиздат, 2004. – 344 с.
3. Проскураков, К. Н. Теплогидравлическое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ / К. Н. Проскураков // Москва : МЭИ, 1984. – 67 с.
4. Горелик, Г. С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику / Г.С. Горелик. – Москва : Физматлит. 2008. – 656 с.
5. Скучик, Е. Основы акустики / Е. Скучик. – Том 1. – Москва : Мир, 1976. – 520 с.
6. Ольсон, Г. Динамические аналогии / Г. Ольсон. – Москва : Государственное издательство иностранной литературы, 1947. – 224 с.
7. Проскураков, К. Н. Виброакустическая паспортизация АЭС – средство повышения их надежности и безопасности / К.Н. Проскураков // Теплоэнергетика. – 2005. – № 12. – С. 30-34.
8. Храмов, Ю. А. Физики / Ю. А. Храмов. – Москва : Наука, 1983. – 248 с.
9. Жуковский, Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах / Н. Е. Жуковский. – Москва – Ленинград : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1949. – 108 с.
10. Слепов, М. Т. Разработка методов и интерпретация данных применительно к системам шумовой диагностики реакторных установок Нововоронежской АЭС: автореферат диссертации кандидата технических наук / М. Т. Слепов. – Обнинск, 1999. – 20 с.
11. Павелко, В. И. Опыт проведения комплексных измерений с использованием разнородных систем на различных этапах пуска энергоблока ВВЭР-1200 / В. И. Павелко, М. Т. Слепов, В. У. Хайретдинов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – № 4. – С. 44-52.
12. Yan J., Yuan K., Tatli E., Karoutas Z., A new method to predict grid-to-rod in a PWR fuel assembly inlet region, Nuclear Engineering and Design, 2011, p. 2974-2982.
13. Bhattachary A., Yu S. D., Kawall G., Numerical simulation of turbulent flow through a 37 element CANDU fuel bundle, Annals of Nuclear Energy, 2012, p. 87-105.
14. Delafontain S., Ricciardi G., Fluctuating pressure calculation induced by axial flow through mixing grid, Nuclear Engineering and Design, 2012, p. 233-246.
15. Lui Z. G., Liu Y., Lu J., Numerical simulation of the fluid-structure interaction for two simple fuel assemblies, Nuclear Engineering and Design, 2013, p. 1-12.
16. Mohany A., Hassan M., Modeling of fuel bundle vibration and the associated wear in a CANDU fuel channel, Nuclear Engineering and Design, 2013, p. 214-222.

REFERENCES

- [1] Samarina A.A. Vibrations of Power Plant Pipelines and Methods of their Elimination. Moscow : Energia, 1979. 288 p. (in Russian).
- [2] Arkadev, G.V. Pavelko V.I., Usanov A.I. Vibrating Diagnostics of WVER. Moscow : Energoatomizdat, 2004. 344 p. (in Russian).

- [3] Proskuryakov, K. N. Thermal-Hydraulic Excitation of Vibrations of the Coolant In-Vessel Devices, Nuclear Power Systems. Moscow : Moscow Power Engineering Institute, 1984. 67 p. (in Russian).
- [4] Gorelik G.S. Oscillations and Waves. Introduction to Acoustics, Radiophysics and Optics. Fizmatlit. 2008. 656 p. (in Russian).
- [5] Skuchic E. The Basics of Acoustics. Volume 1. Moscow : Mir. 1976-520 p. (in Russian).
- [6] Olson G. Dynamic Analogies. Moscow : State. Publishing House of Foreign Literature, 1947. 224 p. (in Russian).
- [7] Proskuryakov K.N. Vibroacoustic Certification of Nuclear Power Plants – a Means of Improving their Reliability and Safety. Heat Power Engineering. 2005. № 12. P. 30-34 (in Russian).
- [8] Khramov Yu.A. Physics. Moscow: Science, 1983. 248 p. (in Russian).
- [9] Zhukovsky N.E. Hydraulic Shock in Water Pipes. Moscow-Leningrad : State Publishing House of Technical and Theoretical Literature, 1949. 108 p. (in Russian).
- [10] Slepov M.T. Development of Methods and Interpretation of Data in Relation to Noise Diagnostics Systems of Novovoronezh NPP Reactor Plants: Thesis Abstract of PhD in Engineering. Obninsk, 1999. 20 p. (in Russian).
- [11] Pavelko V.I., Slepov M.T., Khayretdinov V.U. Experience of Carrying Out Complex Measurements with the Use of Different Systems at Different Stages of the Start-Up of the WWER -1200. News of Universities. Nuclear Power. 2016. № 4. P. 44-52. (in Russian).
- [12] Yan J., Yuan K., Tatli E., Karoutas Z., A New Method to Predict Grid-to-Rod in a PWR Fuel Assembly Inlet Region, Nuclear Engineering and Design, 2011, p. 2974-2982.
- [13] Bhattachary A., Yu S. D., Kawall G., Numerical simulation of turbulent flow through a 37 element CANDU fuel bundle, Annals of Nuclear Energy, 2012, p. 87-105.
- [14] Delafontain S., Ricciardi G., Fluctuating Pressure Calculation Induced by Axial Flow through Mixing Grid, Nuclear Engineering and Design, 2012, p. 233-246.
- [15] Lui Z. G., Liu Y., Lu J., Numerical Simulation of the Fluid-Structure Interaction for Two Simple Fuel Assemblies, Nuclear Engineering and Design, 2013, p. 1-12.
- [16] Mohany A., Hassan M., Modeling of Fuel Bundle Vibration and the Associated Wear in a CANDU Fuel Channel, Nuclear Engineering and Design, 2013, p. 214-222.

Development of Methods for Calculating the Frequency of Acoustic Standing Waves Generated by WWER Reactors

K.N. Proskuryakov¹, S.K. Belova², A.V. Anikeev³, E. Afshar⁴

National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Krasnokazarmennaya st. 14, Moscow, Россия 111250

¹*ORCID iD: 0000-0002-1884-5576*

Wos Researcher ID: I-3583-2017

e-mail: proskuriakovkn@mpei.ru

²*ORCID iD: 0000-0002-4105-6110*

e-mail: twitti.gus@mail.ru

³*ORCID iD: 0000-0001-6463-2328X*

e-mail: Anikeev@mpei.ru

⁴*ORCID iD: 0000-0002-1884-5576*

e-mail: afshari@mpei.ru

Abstract – A comparison of results of calculation of acoustic standing waves frequency with auto spectral power densities of the sensor signals of pressure fluctuations for complex combinations of acoustic elements of the 1st contour of nuclear power plants with WWER-440 is provided. The results of calculation of acoustic standing waves frequencies are found to be in satisfactory agreement with the measurement data. The new approach to calculate the acoustic characteristics of combination of number acoustical elements in the coolant system of the WWER-440 is worked out. The reactor with cold and hot pipelines as a complex Helmholtz resonator was studied for the first time. It is established that the frequencies of acoustic standing waves depend on the number of acoustic elements contained in the supply and discharge pipelines taken into account in the calculation.

Keywords: standing waves, AFM, acoustic mass, acoustic compliance, verification.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК: 621.039.52

**ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ВОСПРОИЗВОДСТВА
БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ С ОКСИДНЫМ ТОПЛИВОМ И
НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ**

© 2019 А.К. Арутюнян, С.Б. Выговский, А.Г. Хачатрян

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В настоящей работе приведены результаты численных исследования, пути повышения коэффициента воспроизводства быстрых реакторов с оксидным топливом и натриевым теплоносителем. Целью данной работы является исследование и обнаружение топлива или топливного сочетания с наилучшими технико-экономическими показателями для реакторной установки БН-800, которые позволят улучшить не только экономические показатели, но и эффективность всего предреакторного цикла. Так как со временем во всем мире обостряются проблемы связанные с уменьшением количества U^{235} , которые приводят к повышению его цены и увеличению количества, накопленного Pu, который в начальном времени был получен в рамках военной промышленности. Но сегодня уже от переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ) ВВЭР и РБМК возникает необходимость нахождения путей направленных на компенсирование этих явлений с приоритетом надежной и безопасной эксплуатации ядерной установки. В работе рассмотрены влияния нескольких важнейших факторов на экономические показатели эксплуатационные характеристики реактора. Этими факторами являются использование разных топлив и топливных сочетаний, геометрические размеры реактора, распределение обогащенного топлива в активной зоне, а также изменение удельного объема топлива в разрешенных пределах. Исследования проводились на базе программного комплекса Time26 и N3D. Так же для расчетов использовались программы Excel и Mathcad.

Ключевые слова: коэффициент воспроизводства, коэффициент неравномерности, топливный цикл, активная зона.

Поступила в редакцию 26.06.2019

После доработки 22.08.2019

Принята к публикации 27.08.2019

Введение

По данным Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), потенциальное повышение эффективности быстрых реакторных систем, работающих в полностью замкнутом цикле, для эффективности использования ядерного топлива и утилизации отходов – и их последствий для устойчивости – широко признано, и во многих странах продолжается активное развитие по технологиям реактора, теплоносителя, топлива и топливного цикла [1].

Замыкание топливного цикла является важнейшей составной частью программы развития ядерной энергетики. При его осуществлении обеспечивается наиболее полное использование ^{238}U и трансураниевых материалов, накапливающихся в облученном топливе. Общее количество плутония, которое будет наработано в отработавшем топливе энергетических ВВЭР к возможному началу серийного ввода быстрых реакторов (2022 г.), составит 120-140 т. в зависимости от масштабов развития ядерной энергетики (40-60 ГВт). Начальная загрузка БН-800 энергетическим плутонием составит 3,6 т, ежегодная подпитка – около 0,7тонн. Следовательно, имеется возможность ввода и эксплуатации серии БН-800 в 2020-2030 гг. Для реализации

указанной задачи необходимо создание технологической цепочки: переработка отработавшего топлива ВВЭР – изготовление смешанного уран-плутониевого топлива для быстрых реакторов. По оценкам мощность завода по переработке отработавшего топлива ВВЭР должна составить ~1500 т/год, централизованного производства смешанного топлива – около 100 т/год, в том числе первой очереди около 50 т/год для пуска головного и первых серийных энергоблоков. Производство смешанного топлива должно создаваться с учетом унификации оборудования и внедрения мер, обеспечивающих возможность перехода на нитридное топливо после подтверждения его работоспособности при экономически приемлемом выгорании [2].

Роль воспроизводства в оценках энергетических ресурсов реактор-размножитель как неисчерпаемый источник энергии

Исследования топливного цикла показывают, что из заданного количества урана в быстром реакторе-размножителе можно получить в 60-80 раз больше энергии, чем в легководном. Хотя отношение количества ^{238}U к количеству ^{235}U равно 140, в легководном реакторе некоторое количество ^{238}U превращается в ^{239}Pu . Поэтому отношение коэффициентов использования урана в БН и в ЛВР оказывается существенно ниже 140. К тому же в детальном анализе топливного цикла необходимо учесть потери топлива при переработке. С учетом сказанного и получается выигрыш в 60-80 раз в эффективности использования топлива в БН. Это отношение можно немного снизить путем усовершенствования конструкции ЛВР и топливного цикла.

Ввиду того, что в легководных реакторах используется только малая доля урана, стоимость получаемой в них энергии чувствительна к цене природного урана, обычно отнесенного к 1 кг (или фунту) оксидного топлива U_3O_8 . Следовательно, бедные руды (т.е. с малой концентрацией урана) оказываются экономически невыгодными для использования в ЛВР. Наоборот, из-за упомянутого выше фактора 60-80, характеризующего преимущество БН по сравнению с ЛВР в использовании топлива, стоимость энергии, производимой БН, нечувствительна к цене U_3O_8 . Следовательно, руды с низким содержанием урана, непригодные для использования в ЛВР, а также уран, добываемый из морской воды, могут использоваться в БН.

Большая эффективность использования урана в сочетании с нечувствительностью к его цене означает, что быстрые реакторы-размножители представляют собой неисчерпаемый источник энергии, по крайней мере если понимать под этим обеспеченность энергией в течении многих тысяч лет. Точно так же торий является другим видом неисчерпаемых запасов топлива для БН, для воспроизводства торий менее эффективен, чем уран. Если же говорить о долгосрочных прогнозах развития энергетики для удовлетворения мировых потребностей, то следует выделить четыре типа неисчерпаемых источников, принципиально дающих решение энергетической проблемы: энергия ядерного деления в реакторах-размножителях, солнечная энергия (с учетом возобновляемых видов энергии солнца), термоядерная энергия и геотермальная энергия.

Хотя использование в БН сырьевого материала из руд с малым содержанием урана экономически оправдано (как показано выше), практическое освоение новых урановых рудников помимо тех, что удовлетворяют потребности легководных реакторов, может оказаться ненужным. Например, в настоящее время в США накопились достаточные запасы так называемого отвалного урана, продукта заводов по газодиффузионному разделению. Этого запаса хватило бы для удовлетворения потребностей США в электрической энергии в течение нескольких сотен лет. Более того, количество этого складываемого урана будет расти до тех пор, пока не исчезнет потребность в ^{235}U для ЛВР [3]. Воспроизводство топлива в уран-плутониевом цикле

возможно только с помощью быстрых нейтронов, а в торий-урановом так же и с помощью тепловых нейтронов.[4]

Исследование с разными оксидными топливами

Для того чтобы определить какой вид топлива более приемлем со стороны коэффициента воспроизводства, был проведен нейтронно-физический расчет реактора на быстрые нейтроны с 800МВт электрической мощностью (БН-800). Геометрические размеры рассчитанного реактора не отличаются от реактора БН-800 расположенного в Белоярской атомной станции, которая выдала свой первый ток в энергосистему России в 10.12. 2015 года и бесперебойно работает до сих пор. Параметры активной зоны БН-800 с Мох топливом приведены в таблице 1 [5].

Таблица 1 – Параметры активной зоны БН-800 с МОХ топливом [Parameters of the core BN-800 with MOX fuel]

БН-800 Мох топливо	
Чисто ТВС активной зоны, шт.	565
Диаметр активной зоны, мм	2560
Высота активной зоны, мм	880
Размер ТВС под ключ, мм	94,5
Диаметр твэла, мм	6,9
Макс. запас реактивности, % $\Delta k/k$	3,6
Средняя энергонапряженность МВт/м ³	430
Макс. линейная мощность твэл, кВт/м	48

Активная зона реактора БН-800 окружена боковым экраном толщиной 40 см. Активная зона разделена на две зоны: зона малого обогащения (ЗМО) и зона большого обогащения (ЗБО). Можно выбрать толщины ЗМО и ЗБО из условий равенства объемов обеих зон, тогда $\Delta R(\text{ЗМО}) = R_{A3} / \bar{2}$; $\Delta R(\text{ЗБО}) = RA3 - \Delta R(\text{ЗМО})$ или из каких-либо иных соображений. Затем выбрать «скачок» обогащений, т.е. отношение обогащения топлива в ЗБО к обогащению топлива в ЗМО, например, $x(\text{ЗБО})/x(\text{ЗМО})$. Потом выбрать 8 видов топлива [6]:

1. $U(35,38)O_2 \equiv U$
2. $Pu(39)O_2 \equiv Pu$
3. $(U33 + Th32)O_2 \equiv U + Th$
4. $(Pu(39,40) + (U38))O_2 \equiv O + U$
5. $(Pu(39,40) + (U(35,38)))O_2 \equiv O + U(\pi)$
6. $(Pu(39,40,41,42) + U38)O_2 \equiv \Theta + U$
7. $(Pu(39,40,41,42) + U(35-38))O_2 \equiv \Theta + U(\pi)$
8. $(Pu(39,40,41,42) + Th32)O_2 \equiv \Theta + Th$

1 – представляет собой традиционный диоксид урана, 2 – чистый диоксид 239-ой плутония, 3 – оксидное топливо в активной зоне 233U и 232Th, а в боковом экране чистый 232Th, 4 – оксидное топливо с оружейным плутонием, в состав которого входит 239Pu – 93 % и 240Pu – 7 % и чистый 238U, 5 – оружейный плутоний с природным ураном 238U = 99,29 % и 235U = 0,71 %, 6 – энергетический плутоний, который состоит из 239Pu = 60 %, 240Pu = 25 %, 242Pu = 11 %, 242Pu = 4% и чистый 238U, 7 – энергетический плутоний с природным ураном, 8 – энергетический плутоний с торием.

Расчет приведен для свежего и средноизотопаического состава топлива. Результаты расчетов показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Расчет для свежего и средноизотопаического состава топлива [Calculation for fresh and medium isotope composition of fuel]

Кэфф= 1	U	Pu	U+Th	O+U	O+U(п)	Э+U	Э+U(п)	Э+Th
X %	15,09	11,98	12,7	12,52	12,22	14,99	14,17	17,92
КВАЗ	0,644	0,913	0,867	0,952	0,918	1,046	1,023	0,997
КВБЭ	0,133	0,165	0,107	0,162	0,166	0,18	0,177	0,138
КВР	0,777	1,078	0,974	1,114	1,084	1,226	1,2	1,135
КВАЗСР	0,701	0,887	0,835	0,925	0,902	1,0022	0,984	0,963
КВБЭСР	0,145	0,173	0,115	0,173	0,179	0,119	0,188	0,142
КВРСР	0,846	1,063	0,95	1,098	1,081	1,192	1,172	1,105

Как видно из таблицы 2 энергетический плутоний с чистым U238 имеет самый высокий коэффициент воспроизводства в активной зоне и получается больше единицы. Но с экономической точки зрения отчистка или обеднение урана – затратный процесс, и для поддержания реактора в критичном состоянии необходимо немного увеличить обогащение топлива по сравнению с энергетическим плутонием с природным ураном. Для дальнейшего исследования из всех вышеперечисленных топливных видов выберем оружейный плутоний с природным ураном и энергетический плутоний с природным ураном. Рассмотрим влияние геометрических размеров на основные параметры реактора, в основном на КВ (Коэффициент воспроизводства). Высокая концентрация горючего в твэлах БН делает особенно острой проблему энергонапряженности, но одновременно снижает вероятность поглощения нейтронов конструкционными материалами, теплоносителем (что облегчает его выбор) и осколками деления. В этом отношении высокое обогащение способствует сохранению высоких значений КВ в реальных конструкциях. Высокая концентрация горючего вызывает необходимость достижения глубокого выгорания горючего, как по экономическим соображениям, так и с точки зрения темпов воспроизводства [7].

Рассмотрим влияние геометрических размеров на КВ_{Аз}. Для исследования приведем несколько активных зон с разными геометрическими размерами (табл. 3). Начнем с увеличения диаметра активной зоны за счет уменьшения энергонапряженности реактора. Можем определить объем активной зоны:

$$V = \frac{Q}{q_v} \quad (1)$$

Определим диаметр активной зоны:

$$D_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot V_0}{\pi \cdot H_0}} \quad (2)$$

Эффективная высота эффективной зоны:

$$K_z \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot H}{2 \cdot H_{\text{eff}}}\right) = \left(\frac{\pi \cdot H}{2 \cdot H_{\text{eff}}}\right) \quad (3)$$

Таблица 3 – Зависимость КВ от объема активной зоны и от ее высоты [The dependence of the CV of the volume of the active zone and the height of the active zone]

$K_{эфф} = 1$		$O + U(\pi)$	$\Xi + U(\pi)$
$q_v = 350$ кВт/л $R = 150$ $H = 88$ см	X - %	12	14,12
	KV_{AZ}	0,937	1,043
	$KV_{БЭ}$	0,128	0,137
	KV_P	1,065	1,181
$q_v = 300$ кВт/л $R = 162,5$ $H = 88$ см	X - %	11,9	14,01
	KV_{AZ}	0,945	1,057
	$KV_{БЭ}$	0,112	0,12
	KV_P	1,057	1,172
$q_v = 250$ кВт/л $R = 78$ $H = 88$ см	X - %	11,84	13,91
	KV_{AZ}	0,954	1,061
	$KV_{БЭ}$	0,098	0,103
	KV_P	1,052	1,161
$K_{эфф} = 1$ $K_r > 1,7$ $q_v = 300$ кВт/л		$O + U(\pi)$	$\Xi + U(\pi)$
$R = 196,8$ $H = 60$ $H_{эфф} = 85$ см	X - %	13,22	15,48
	KV_{AZ}	0,836	0,936
	$KV_{БЭ}$	0,069	0,085
	KV_P	0,905	1,021
$R = 162,5$ $H = 8$ $H_{эфф} = 120$ см	X - %	11,9	14,01
	KV_{AZ}	0,945	1,057
	$KV_{БЭ}$	0,112	0,12
	KV_P	1,057	1,172
$R = 148,8$ $H = 105$ $H_{эфф} = 160$ см	X - %	11,23	13,2
	KV_{AZ}	1,012	1,124
	$KV_{БЭ}$	0,142	0,152
	KV_P	1,154	1,276

Из рассматриваемых вариантов оптимальным выбором активной зоны является $q_v = 300$ кВт/л. С увеличением диаметра активной зоны увеличивается КВ и чем больше, тем лучше. Но это приводит к уменьшению КВ в боковом экране, что уменьшает его эффективность. Уменьшение утечки нейтронов из активной зоны приводит к уменьшению начального обогащения топлива, что с точки зрения экономики очень выгодно, но также приводит к увеличению НПЭР-а (натриевый пустотный эффект реактивности).

Был проведен расчет для выравнивания радиального тепловыделения. Для этого мы выбрали, как делящий материал энергетического плутония в первом случае с природным ураном, так и с торием во втором случае, и разделили активную зону на 3 зоны, пытаясь приблизить значение K_r к единице. Результаты на рисунке 1. Получается, что выравнивание энерговыделения приводит к уменьшению КВ.

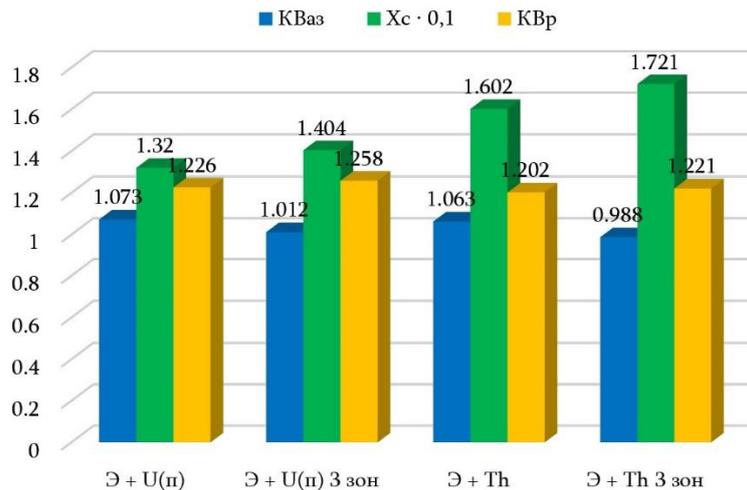


Рисунок 1 – Зависимость KB из Kг (коэффициента неравномерности) [Dependence of the coefficient of reproduction on the coefficient of unevenness]

Как известно KB можно увеличить с помощью увеличения объемной доли топлива в 1 см^3 . Для увеличения объемной доли топлива необходимо сделать теплогидравлический расчет. Так как MOX-топливо не обладает высокой теплопроводностью, необходимо тщательно рассмотреть каждую деталь. Его температура плавления очень высокая, но из-за маленькой теплопроводности перепад температуры в топливном сердечнике получается велик и в течении кампании реактора, то есть с глубиной выгорания она всегда поднимается и уже в конце кампании достигает своего максимального значения. Необходимо определить уровень увеличения и запаса до температуры плавления, за счет чего можно увеличить объемную долю.

Термическое расширение

Коэффициенты термического расширения топлива и оболочки определяют величину зазора между ними при выходе твэла на мощность. Коэффициенты термического расширения UO_2 , PuO_2 и MOX-топлива имеют близкие значения и могут быть с хорошей точностью описаны уравнением (4) [8]:

Для высокого температурного интервала, вплоть до температуры плавления:

$$L(T) = L(273) \cdot (9,9672 \cdot 10^{-1} + 1,179 \cdot 10^{-5} \cdot T - 2,429 \cdot 10^{-9} \cdot T^2 + 1,219 \cdot 10^{-12} \cdot T^3)$$

$$\alpha_{\text{cp}} = 1,1833 \cdot 10^{-5} - 5,013 \cdot 10^{-9} \cdot T + 3,756 \cdot 10^{-12} \cdot T^2 - 6,125 \cdot 10^{-17} \cdot T^3 \quad (4)$$

Отклонение от стехиометрии в сторону застехиометрии повышает коэффициенты термического расширения оксидного топлива, а в сторону достехиометрии – понижает. Влияние нестехиометрии может быть учтено с помощью следующего множителя: $[1 + (3,9 \pm 0,9) \cdot x]$, где x – отклонение от стехиометрии. Для смешанных уран-плутониевых оксидов термическое расширение при температуре T определяется как средняя величина из соответствующих значений для UO_2 и PuO_2 , пропорционально их массовой доле. Увеличение концентрации плутония в MOX-топливе приводит к снижению коэффициента термического расширения при низких температурах и его повышению при высоких температурах.

Расчет теплового расширения по радиусу

Расширение внутренней оболочки и топливного сердечника при максимальной температуре (рис. 2):

$$d_{\text{Обвн}} = d_{\text{Обв}} + \alpha \cdot (T_{\text{об}} + 1) = 6.1 + 1.8 \cdot 10^{-5} \cdot 591 \approx 6,011 \text{ мм}$$

$$d_{\text{Топ}} = d_{\text{Топ}} + 1,256 \cdot 10^{-5} \cdot 1480 \approx 6,02 \text{ мм} \quad (5)$$

$$\delta_{\text{ГЗН}} = (d_{\text{Обвн}} - d_{\text{Топ}}) \approx 0,001 \text{ мм}$$

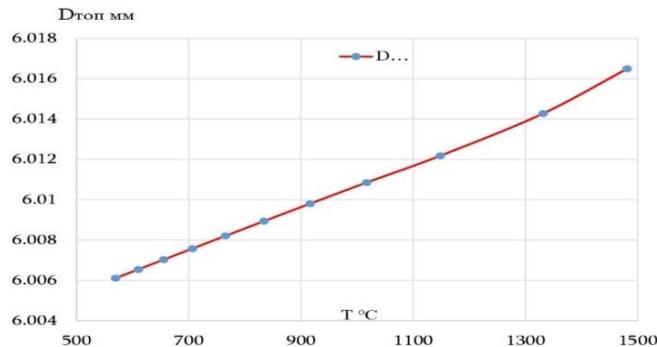


Рисунок 2 – Зависимость расширения топливной таблетки от температуры [The dependence of the expansion of the fuel pellets on temperature]

После расширения и распухания уменьшается газовый зазор и в конце кампании, когда температура внутри таблетки достигает своего максимального значения, газовый зазор между оболочкой твэла на мощность. Коэффициенты термического расширения UO₂, PuO₂ и MOX-топлива и таблеткой почти исчезает. За счет этого перепад температуры в газовом зазоре уменьшается и становится минимальным, которое способствует сохранению температурного режима в центре таблетки. А в середине таблетки температура не превышает свое предельное значение.

Температура плавления. Величина температуры плавления является важной характеристикой ядерного топлива, так как она определяет допустимую мощность твэла. Температура плавления смешанных оксидов урана и плутония плавно понижается от температуры плавления UO₂ (2847 ± 30°C) до температуры плавления PuO₂ (2428 ± 35°C) по мере повышения в них концентрации оксида плутония. Отклонение от стехиометрического состава в области до или за стехиометрии, а также выгорание снижают температуру плавления смешанных оксидов. Последнее обстоятельство обусловлено физико-химическим взаимодействием матрицы топлива, как с продуктами деления, так и с оксидом америция Am₂O₃, температура плавления которого составляет 2197 ± 15°C. Принято считать, что при выгорании 100 ГВтсут/т температура плавления MOX-топлива снижается приблизительно на 100 °C.

Теплопроводность MOX-топлива

Радиальное распределение температуры в топливном сердечнике, а также максимальная температура в центре твэла определяется теплопроводностью λ , которая зависит от температуры, пористости, стехиометрического состава, размера зерен, характера и количества примесей и т.д. оксидного топлива. Теплопроводность оксидного топлива можно рассматривать, по крайней мере, как сумму трех составляющих: фононной или решеточной проводимости $\lambda_{\text{ф}}$, фотонной или радиационной $\lambda_{\text{р}}$ и электронной (включая амбиполярную вызванную совместным перемещением зарядов обоих знаков, т.е. электронов и положительно заряженных ионов) $\lambda_{\text{е}}$:

$$\lambda = \lambda_{\text{ф}} + \lambda_{\text{р}} + \lambda_{\text{е}} \quad (6)$$

В оксидном топливе основную роль в процессе переноса тепла при температурах ниже 1600-1500 К играет фононная составляющая теплопроводности, при температуре выше 1500 К оксидное топливо является полупроводником.

Первых двух составляющих в общую теплопроводность диоксида урана представлены на рисунке, из которого видно, что при высоких температурах вклад электронной составляющей теплопроводности превышает вклад фононной. Таким образом теплопроводность UO_2 теоретической плотности снижается с повышением температуры, достигая минимума при 1800-2000 К, а затем повышается вплоть до температуры плавления. Подобным образом ведет себя и теплопроводность МОХ-топлива.

Некоторые соотношения, описывающие температурную зависимость теплопроводности диоксида урана, содержат три члена, но в большинстве из них используются два члена: первый, который уменьшается с температурой, и второй, который возрастает с температурой. Эти два слагаемые соответствуют двум составляющим переноса тепла: фононной (снижающейся с температурой) и электронной (повышающейся с температурой). При этом в некоторых соотношениях последнее слагаемое может включать в себя другие составляющие (радиационную и амбиполярную). Чтобы найти распределение теплопроводности, надо знать теплопроводность таблетки в начале кампании с учетом пористости и выгорания. Теплопроводность твердого $(U+Pu)O_2$, плотностью 95% теоретической определяется из следующего соотношения [9].

$$\lambda(T) = 1,158 \cdot \left(\frac{100}{6,548 + 23,533 \cdot t} + \frac{6400}{t^{5/2}} \cdot \exp\left(-\frac{16,35}{t}\right) \right) \quad (7)$$

Формула Хардинга и Мартина (Harding and Martin), которая широко используется в компьютерных программах для расчета температуры топлива, а также как основа для других соотношений, где $t = T/1000$, T температура в К, а множитель 1,158 необходим для пересчета значений коэффициента теплопроводности образцов $(U+Pu)O_2$ с 95 на 100 % от теоретической плотности (ТП). Это выражение справедливо для температур от 298 до 3120 К. С помощью этого выражения можно получить распределение температуры в топливном сердечнике по радиусу соответственно для среднего и максимального напряженного топливного сердечника.

$$T_{\text{на}}^{\text{то}}(z) = T_{\text{ср}}^{\text{теп}} + X \cdot q_{\text{ю}} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H_0}\right) \cdot R_T \quad (8)$$

$$T_{\text{на}}^{\text{макс}}(z) = T_{\text{макс}}^{\text{теп}} + X \cdot q_{\text{макс}}^{\text{ю}} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H_0}\right) \cdot R_T$$

где X – доля генерированного тепла в твэлах принято 0,9 [10], R_T является общим термическим сопротивлением твэла [11].

$$R_T = \frac{1}{\pi \cdot d_{\text{ТВЭЛ}} \cdot \alpha(z)} + \frac{\ln\left(\frac{d_{\text{ТВЭЛ}}}{d_{\text{ТВЭЛ}} - 2 \cdot \delta_{\text{об}}}\right)}{2\pi\lambda_{\text{об}}} + \frac{\ln\left(\frac{d_{\text{ТВЭЛ}} - 2 \cdot \delta_{\text{об}}}{d_{\text{ГОШ}}}\right)}{2\pi\lambda_{\text{г.з.}}} \quad (9)$$

Но как показывал эксплуатационный опыт при работе реактора коэффициент теплопроводности (λ) падает из-за накопления продуктов деления и зависимость λ от глубины выгорания (Bu) облученного твердого $(U + Pu)O_2$ с плотностью 95% от теоретической можно оценить следующим выражением [12]:

$$\lambda_{\text{топ}} = [0,1148 + 0,0035 \cdot Bu + 2,475 \cdot 10^{-4} \cdot (1 - 0,00333 \cdot B) \cdot T]^{-1} \quad (10)$$

где T является локальной температурой топлива в $^{\circ}C$ и Bu – локальное выгорание топлива в 100 МВт·сут/кг.

Результат разницы теплопроводности для среднего и максимально напряженного твэла при 100 МВт·сут/кг глубины выгорания топлива приведен на рисунке 3.

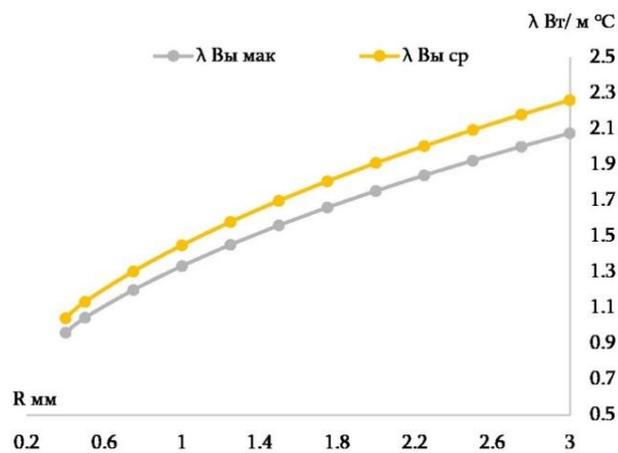


Рисунок 3 – Теплопроводность MOX-топлива, при выгорании 100 МВт·сут/кг [Thermal conductivity of MOX fuel at a burnout of 100 MW·day/kg]

Исходя из результатов проведенного расчета, смогли уменьшить диаметр центрального отверстия от 1,8 мм до 0,8 мм, а максимальную температуру, которая получается в поверхности центральной отверстия топливного сердечника для максимально напряженного и выгорающего топлива не больше 2420 $^{\circ}C$, что вполне находится в допущенном интервале. Необходимо отметить, что в среднем выгорание не превышает 80 МВт·сут/кг, а расчет был проведен для 100 МВт·сут/кг (рис. 4).

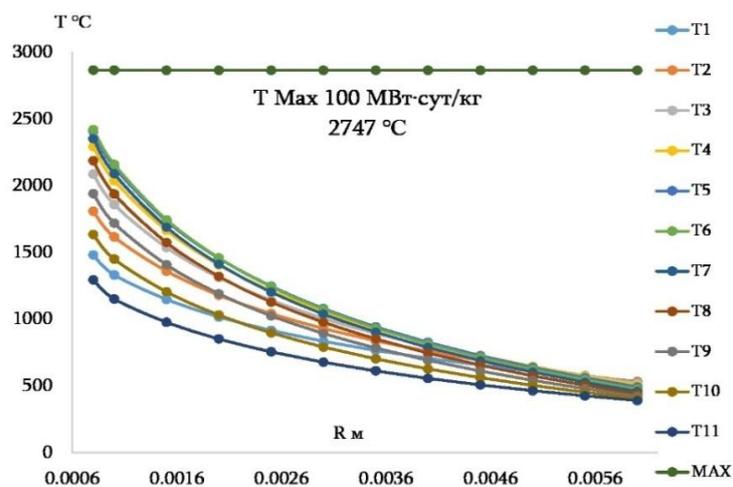


Рисунок 4 – Зависимость температуры твэла из глубины выгорания по радиусу [The dependence of the temperature of the fuel rod from the burnout depth along the radius]

Из теплогидравлического расчета стало известно, что можно увеличить объемную долю топлива с $\epsilon_T = 0,4588$ до $\epsilon_T = 0,4952$ за счет центрального отверстия без изменения внешнего диаметра таблетки и оболочки соответственно. Сейчас проводим тот же нейтронно-физический расчет уже с новым, более массивным топливом. Результаты расчета приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Нейтронно-физический расчет для более массивного топлива [Neutron-physical calculation for more massive fuel]

$K_{эфф} = 1$ $q_v = 300$ кВт/л	$\Xi + U(\pi)$	$\Xi + Th$
$X_{ЗМО/ЗСО/ЗВО} - \%$	11,72/ 12,22 /17,65	14,29/15,18/20,54
K_T	1,11	1,11
$K_{В_{А3}}$	1,104	1,062
$K_{В_{БЭ}}$	0,267	0,269
$K_{В_P}$	1,371	1,33
$K_{В_{А3с}}$	1,043	1,013
$K_{В_{БЭс}}$	0,236	0,222
$K_{В_{Pс}}$	1,28	1,235

Как предполагали, увеличение объемной доли приводит к увеличению КВ. В средноизотопическом составе КВ активной зоны получается больше единицы.

Рассмотрим еще один вариант (табл. 5), поскольку торий также обладает высокими показателями, таких как сравнительно высокий КВ и сравнительно маленький НПЭР. Его можно добавлять в топливо вместо ^{238}U , как воспроизводящий материал с энергетическим плутонием.

Таблица 5 – Результаты проведенного расчета [Calculation results]

$K_{эфф} = 1$	$Th = 0$	$Th = 12,5$	$Th = 0,25$	$Th = 0,5$	$Th = 0,75$	$Th = 1$
$X \%$	11,79/14,74	12,29/15,41	12,69/15,97	13,51/16,7	14,04/17,69	14,56/18,33
K_T	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17
$K_{В_{А3}}$	1,117	1,121	1,123	1,115	1,1	1,076
$K_{В_{БЭ}}$	0,227	0,231	0,235	0,234	0,233	0,23
$K_{В_P}$	1,343	1,352	1,358	1,35	1,333	1,306
$K_{В_{А3СР}}$	1,056	1,064	1,066	1,06	1,045	1,022
$K_{В_{БЭСР}}$	0,213	0,201	0,199	0,195	0,191	0,188
$K_{В_{PСР}}$	1,269	1,264	1,264	1,314	1,236	1,21

Из таблицы 5 видно, что увеличение количества торий в топливе сначала приводит к увеличению $K_{В_{А3}}$, а потом к падению. Но с увеличением количества торий увеличивается доля делящегося материалов необходимых для поддержания реактора в критическом состоянии.

Заключение

Расчеты показывали, что применение МОХ топлива в быстрых реакторах приводит к существенному увеличению $K_{В_{А3}}$, примерно 1,4 раза. Так же геометрические размеры играют существенную роль, как на теплогидравлических параметрах, так и на нейтронно-физических характеристиках. Энерговыравнивание приводит к уменьшению $K_{В_{А3}}$. В конце было доказано, что увеличение объемной доли топлива в 1 см^3 объеме приводит к росту $K_{В_{А3}}$ и был получен $K_{В_{А3}}$ больше чем на обычных вариантах в 1,071 раза и применение смесь тория и урана как воспроизводящий материал также приводит к росту $K_{В_{А3}}$ в активной зоне приблизительно в 1,01 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Larson A. Rapid Advancements for Fast Nuclear Reactors. POWER. – URL: <https://www.powermag.com/rapid-advancements-for-fast-reactors/?pagenum=1> (the date of circulation: 08/05/2019)
2. Рачков, В. И. Концепция перспективного энергоблока с быстрым натриевым реактором БН-1200 / В. И. Рачков, В. М. Поплавский, А. М. Цибуля, Ю. Е. Багдасаров // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108, вып. 4. – С. 202-206.
3. Уолтер, А. Реакторы-размножители на быстрых нейтронах / А. Уолтер, А. Рейнольдс. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 623 с.
4. Ринейский, А. А. Инжиниринг энергоблока с реактором на быстрых нейтронах БН-800 / А. А. Ринейский // Атомные стратеги. – 2006. – № 23. – С. 49-60
5. Ишханов, Б. С. Реакторы на быстрых нейтронах / Б. С. Ишханов, М. Е. Степанов, Т. Ю. Третьякова // Ядерная физика и человек URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/mfk/mfk09.pdf> (дата обращения: 08.05.2019).
6. Апсэ, В. А. Использование программы TIME26 в курсовом проектировании быстрых реакторов и электроядерных установок / В. А. Апсэ, А. Н. Шмелев. – Москва : Изд-во МИФИ. – 2008. – 63 с.
7. Лейпунский, А. И. Реакторы на быстрых нейтронах / А. И. Лейпунский // Атомная энергия. – 1974. – Том 36, вып. 5. – С. 341-355.
8. Калинин, Б. А. Ядерные топливные материалы / Б. А. Калинин, П. А. Платонов, И. И. Чернов, Я. И. Штромбах. – Москва : Изд-во МИФИ 2008. – Т. 6, ч.2. – 672 С.
9. Сияткин, Е. Ю. Теплофизические свойства твердого диоксида урана в рабочем диапазоне температур современных ВВЭР / Е. Ю. Сияткин, А. В. Кузьмин // XVII международная научно-практическая конференция: Современная техника и технологии: материалы международной конференции, Томск, 18-22 апрель 2011 г. – Томск : Томский политехнический университет, 2011. – С. 263-264.
10. Kannan, I. Power Reactors. NPTEL, Mechanical Engineering. – URL: <https://nptel.ac.in/courses/112101007/1> (the date of circulation: 04/27/2019).
11. Дементьев, Б. А. Ядерные энергетические реакторы / Б. А. Дементьев. – Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 280 С.
12. Kuzmin A.V., Yurkov M.M. Thermal conductivity coefficient UO₂ of theoretical density and regular stoichiometry : Thermophysical Basis of Energy Technologies. MATEC Web of Conferences. Tomsk, Jan. 2017.

REFERENCES

- [1] Larson A. Rapid Advancements for Fast Nuclear Reactors. POWER. URL: <https://www.powermag.com/rapid-advancements-for-fast-reactors/?pagenum=1> (the date of circulation: 08/05/2019)
- [2] Rachkov V.I., Poplavskiy V.M., Tsibulya A.M., Bagdasarov YU.Ye. Kontseptsiya perspektivnogo energobloka s bystrym natriyevym reaktorom BN-1200 [The Concept of Promising Power Unit with BN-1200 Fast Sodium Reactor]. Atomnaya energiya [Nuclear Energy]. 2010. T. 108, issue 4. P. 202-206 (in Russian).
- [3] Uolter A., Reynol'ds A. Reaktory-razmnozhiteli na bystrykh neytronakh [Fast Neutron Breeder Reactors]. Moskva [Moscow]. Energoatomizdat, 1986. 623 p. (in Russian).
- [4] Rineyskiy A.A. Inzhiniring energobloka s reaktorom na bystrykh neytronakh BN-800 [Engineering Unit with Fast Neutron Reactor BN-800]. Atomnyye strategi [Atomic strategies]. 2006. № 23. P. 49-60 (in Russian).
- [5] Ishkhanov B.S., Stepanov M.Ye., Tret'yakova T.Yu. Reaktory na bystrykh neytronakh [Fast Neutron Reactors]. Yadernaya fizika i chelovek [Nuclear Physics and Human] URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/mfk/mfk09.pdf> (date of application: 08.05.2019).
- [6] Apse V.A., Shmelev A.N. Ispol'zovaniye programmy TIME26 v kursovom proyektirovanii bystrykh reaktorov i elektroyadernykh ustanovok [The Use of the TIME26 Program in course Design of Fast Reactors and Power Plants]. Moskva [Moscow]. Izd-vo MIFI 2008. 63 p. (in Russian).
- [7] Leypunskiy A.I. Reaktory na bystrykh neytronakh [Fast Neutron Reactors]. Atomnaya energiya [Nuclear Energy]. 1974. – T 36, issue 5. P. 341-355 (in Russian).
- [8] Kalin B.A., Platonov P.A., Chernov I.I., Shtrombakh Ya.I. Yadernyye toplivnyye materialy [Nuclear Fuel Materials]. Moskva [Moscow]: MEPhI Publishing House 2008. T. 6, Part.2. 672 p. (in Russian).

- [9] Sinyatkin Ye.Yu, Kuz'min A.V. Teplofizicheskiye svoystva tverdogo dioksida urana v rabochem diapazone temperatur sovremennykh VVER [Thermophysical Properties of Solid Uranium Dioxide in the Working Temperature Range of Modern WWER]. XVII mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya [XVII International Scientific and Practical Conference]: Sovremennyye tekhnika i tekhnologii [Modern Techniques and Technologies]: materialy mezhdunar. Konf [Materials of the International Conference]. Tomsk, 18-22 April 2011 – Tomsk: Tomskiy politekhnicheskii universitet [Tomsk Polytechnic University]. 2011. P. 263-264 (in Russian).
- [10] Kannan I. Power Reactors. NPTEL, Mechanical Engineering. – URL: <https://nptel.ac.in/courses/112101007/1> (the date of circulation: 04/27/2019).
- [11] Dement'ev B.A. Yadernyye energeticheskiye reaktory [Nuclear Power Reactors]. Moskva [Moscow]. Energoatomizdat, 1984. 280 p. (in Russian).
- [12] Kuzmin A.V., Yurkov M.M. Thermal conductivity coefficient UO₂ of theoretical density and regular stoichiometry : Thermophysical Basis of Energy Technologies. MATEC Web of Conferences. Tomsk, Jan. 2017.

Ways to Improve the Coefficient Reproduction of Quick Reactors with Oxide Fuel and Sodium Coolant

A.K. Harutyunyan¹, S.B. Vygovskiy², A.G. Khachatryan³

National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute (NRNU MEPhI), Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 1154091

¹*ORCID iD: 0000-0003-1281-0791*

Publons: Aram Harutyunyan

e-mail: aram5041@outlook.com

²*ORCID iD: 0000-0002-9995-1222*

WoS Researcher ID: P-5608-2018

e-mail: vgovskii@mail.ru

³*ORCID iD: 0000-0002-1785-5342*

WoS Researcher ID: P-5318-2018

e-mail: artsrn-khachatryan@mail.ru

Abstract – This article presents the results of a numerical study of ways to increase the reproduction rate of fast reactors with oxide fuel and sodium coolant. The purpose of this work is to study and detect fuel or fuel combination with the best technical and economic indicators for the BN-800 reactor facility which will increase not only economic indicators but also the efficiency of the entire pre-reactor cycle. Since over time the problems associated with a decrease in the amount of U²³⁵ which leads to an increase in its price and an increase in the amount of accumulated Pu which in the initial time is obtained in the framework of the military industry, worsen throughout the world. But today there is a need to look for ways to compensate for these phenomena with the priority of reliable and safe operation of a nuclear installation from the reprocessing of spent nuclear fuel (spent nuclear fuel) from WWER and RBMK. The paper examines the effects of several important factors on the performance of the reactor and on economic performance. These factors are the use of different fuels and fuel combinations, the geometrical dimensions of the reactor, the distribution of enriched fuel in the core, as well as the change in the specific volume of fuel within the permitted limits.

Keywords: reproduction rate, non-uniformity coefficient, fuel cycle, reactor core.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 004.65:53.083.91:67.05:621.039

АВТОМАТИЗАЦИЯ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБОРУДОВАНИЯ НОВЫХ ЭНЕРГБЛОКОВ АЭС

© 2019 З.О. Кавришвили, В.Л. Рачков

*Ростовский филиал «Ростоватомтехэнерго» АО «Атомтехэнерго», Волгодонск-28,
Ростовская обл., Россия*

Современное техническое диагностирование позволяет обследовать оборудование многочисленными методами неразрушающего контроля, которые дополняют друг друга и повышают достоверность оценки технического состояния. Сочетание большого объема диагностических данных и многообразия методов диагностирования подводит к необходимости объединения потоков диагностической информации в единой информационной системе, обеспечивающей автоматизацию сбора и обработки диагностических параметров. Силами специалистов «Ростоватомтехэнерго» была спроектирована и реализована информационная система, обладающая необходимыми свойствами.

Ключевые слова: автоматизированная система, диагностические параметры, диагностика оборудования, оборудование энергоблоков АЭС

Поступила в редакцию 04.06.2019

После доработки 07.08.2019

Принята к публикации 13.08.2019

Введение

Переход предприятий атомной промышленности от традиционного подхода к обслуживанию оборудования «по регламенту» к обслуживанию «по техническому состоянию» с применением новых многочисленных методов технического диагностирования, диктует необходимость ведения учёта и анализа результатов технического диагностирования, а также прогнозирования технического состояния [1-8].

Очевидным решением данной проблемы является предоставление предприятиям-владельцам оборудования информационной автоматизированной системы диагностического сопровождения, заполняемой информацией на всех стадиях жизненного цикла АЭС начиная с анализа проектной и заводской документации в подготовительный период пуско-наладочных работ (ПНР).

Однако, для получения существенного экономического эффекта недостаточно применения только цифровых технологий (т.е. разработки информационной системы). Необходимо учесть истинные потребности Заказчика и предоставить ему современный эргономичный инструмент, гармонично вписывающийся в его систему управления ресурсом оборудования (УРО).

Накопление диагностической информации

Началом успешной реализации подхода обслуживания оборудования по техническому состоянию является рациональное структурирование пространства диагностической информации в рамках задач УРО, создание алгоритма получения, накопления и обработки данных. Исходным источником получения диагностической информации являются индивидуальные испытания и комплексное опробование

оборудования в ходе ПНР энергоблоков АЭС, вводимых в эксплуатацию. При этом можно выделить два основных этапа информационного наполнения автоматизированной системы, осуществляющей сбор и обработку диагностических параметров (рис. 1):

1) справочной, нормативной и первичной диагностической информацией, полученной в подготовительный период в ходе сопровождения заводских приемосдаточных испытаний (ПСИ) и строительно-монтажных работ (СМР) – на этом этапе обеспечивается накопление значений диагностических параметров, которые определяют начальное и «эталонное» техническое состояние (ТС) работоспособного оборудования;

2) функциональной мониторинговой информацией о ТС оборудования в процессе ПНР – на этом этапе формируется массив диагностических параметров, анализ характера изменения которых с течением времени позволяет количественно оценивать ресурсные характеристики оборудования и получить объективную картину о прогнозируемых сроках надежной и безопасной эксплуатации технологического оборудования к моменту ввода блока АЭС в эксплуатацию.

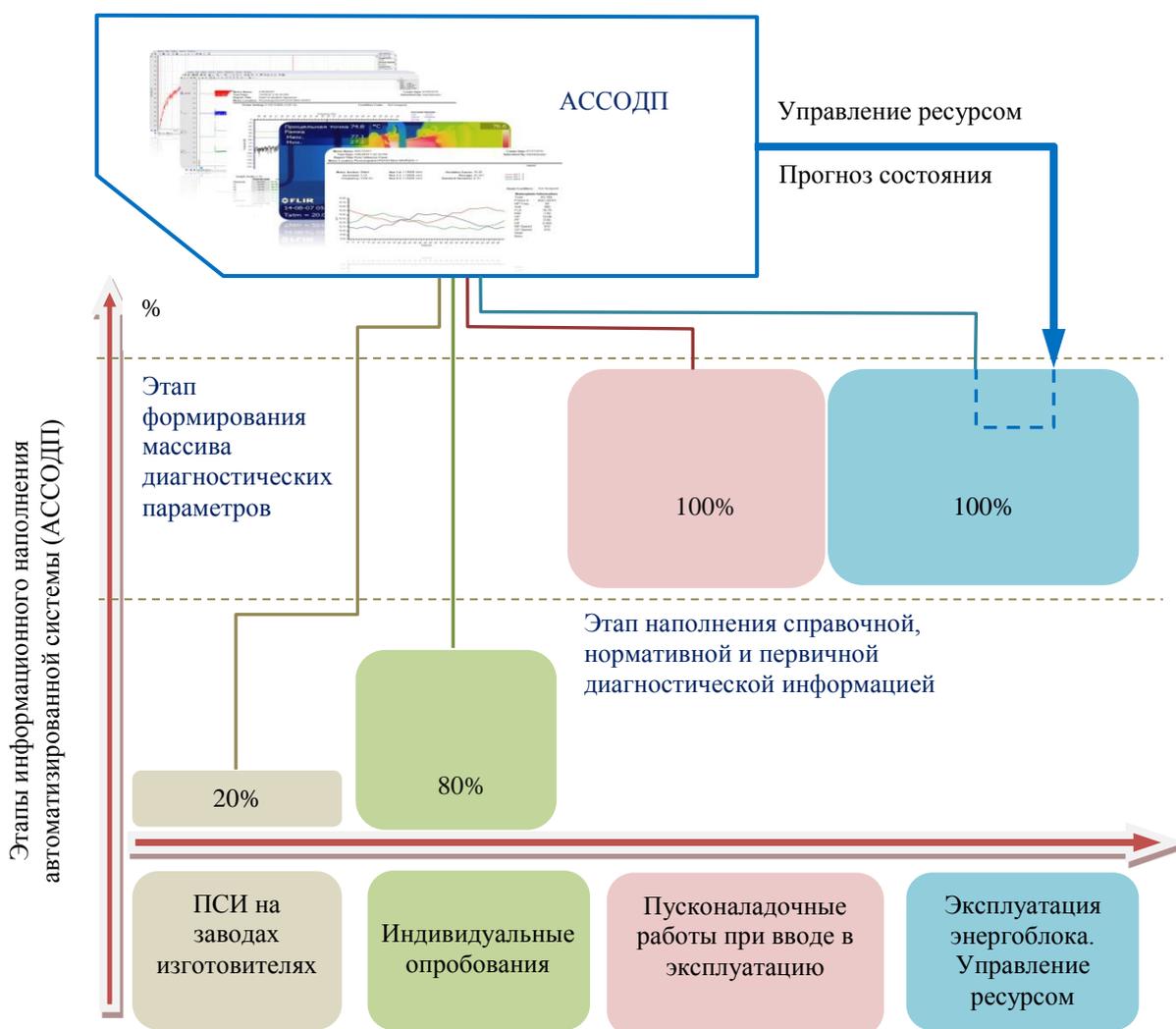


Рисунок 1 – Этапы информационного наполнения ACCODP [Content stages of automated system for collecting and processing diagnostic parameters]

Поддержка комплексной диагностики и обеспечение инструментами диагностического анализа

В основу функционирования автоматизированной системы сбора и обработки диагностических параметров (АССОДП) с прогнозированием технического состояния положен принцип комплексной диагностики оборудования, или «мульти-метод», основанный на применении совокупности нескольких методов контроля и алгоритма обработки информации.

Реализованные в АССОДП инструменты комплексной диагностики насосных агрегатов позволяют анализировать результаты: вибродиагностического контроля состояния агрегата (начиная от подшипниковых узлов до контурных границ агрегата); тепловизионного контроля подшипниковых узлов и систем охлаждения; акустического контроля подшипниковых узлов в ультразвуковом диапазоне; диагностики состояния электродвигателя по параметрам питающей сети; контроля натяжения и остаточного напряженно-деформированного состояния трубопроводов подачи и отвода рабочей среды насосного агрегата (рис. 2).

Виды диагностического обследования

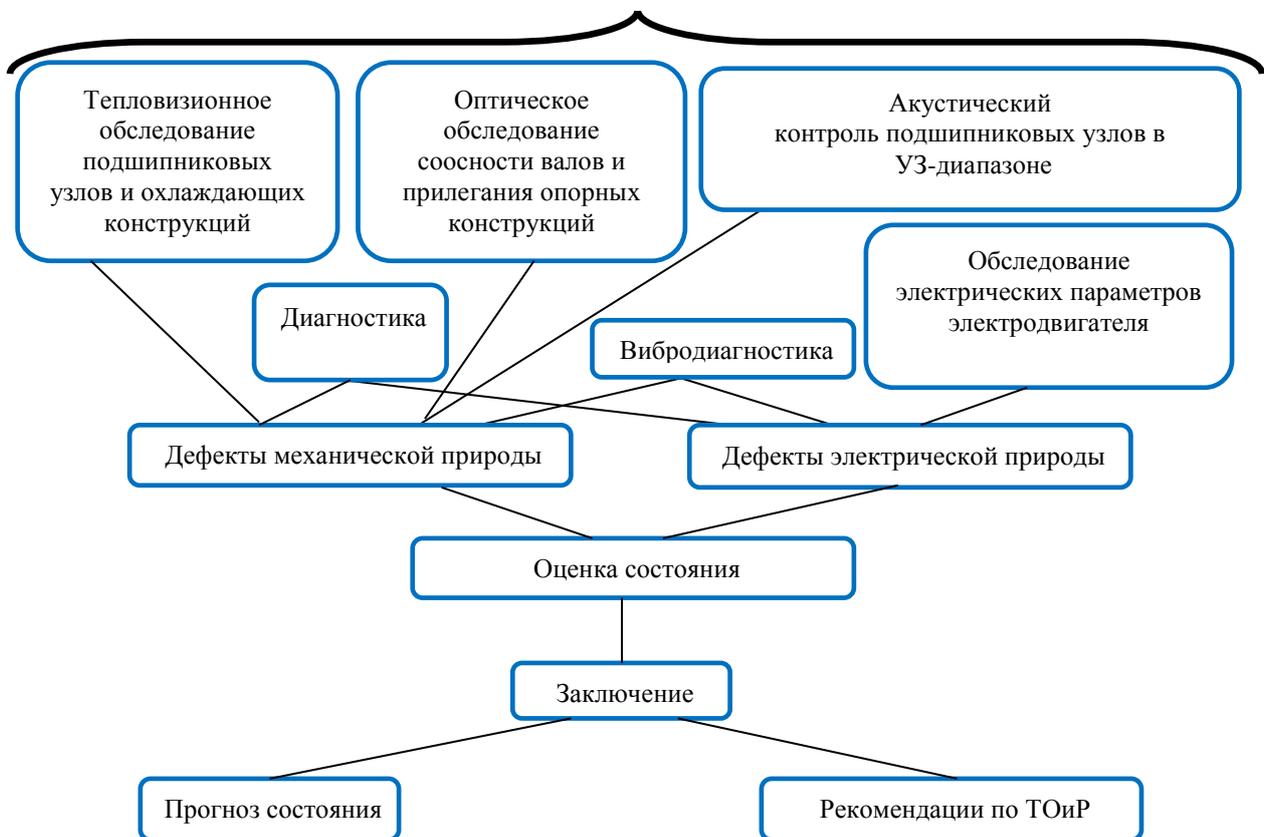


Рисунок 2 – Схема комплексной диагностики [Integrated diagnostics scheme]

Для более полной оценки состояния «мульти-методом» будет правильным добавить диагностику смазки вращающихся частей агрегата там, где это целесообразно.

Реализация в АССОДП поддержки комплексной диагностики привело к повышению производительности труда специалистов-диагностов за счет предоставления удобных инструментов анализа диагностической информации и оперативного доступа к диагностической информации для определения текущего состояния готовности оборудования.

Также в АССОДП реализован ряд дополнительных инструментов, улучшающих эффективность работы обслуживающего персонала:

- 1) предоставление необходимого набора технических характеристик оборудования;
- 2) обеспечение автоматизированного расчета характерных частот дефектов подшипниковых узлов (рис. 3);
- 3) расчет критериев работоспособности;
- 4) автоматизация протоколирования (рис. 4);
- 5) определение прогнозных характеристик и рекомендаций по техническому обслуживанию и ремонту (ТОиР) оборудования.

Кроме числовой и текстовой информации в АССОДП предусмотрено хранение массивов данных в виде текстовых, аудио-файлов и других форматов, а также графической информации, необходимых для наглядного представления результатов диагностирования и формирования протоколов. В такой форме хранятся: спектральные характеристики, осциллограммы сигналов, термограммы, графики по результатам испытания изоляции и оценки состояния ротора и т.д. (рис. 5).

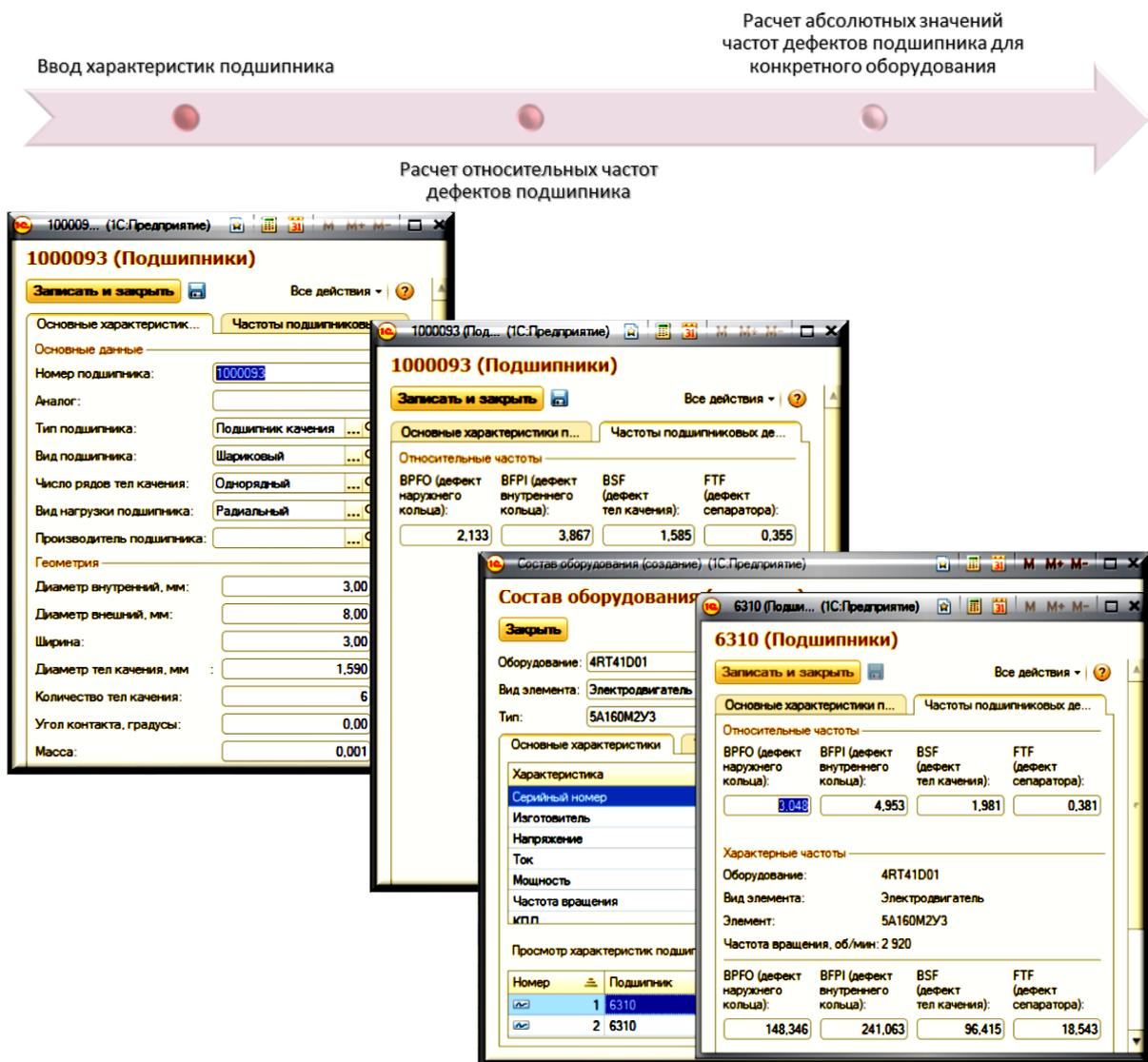


Рисунок 3 – Автоматизированный расчет характерных дефектов подшипниковых узлов [Automated calculation of specific defects of bearing assemblies]

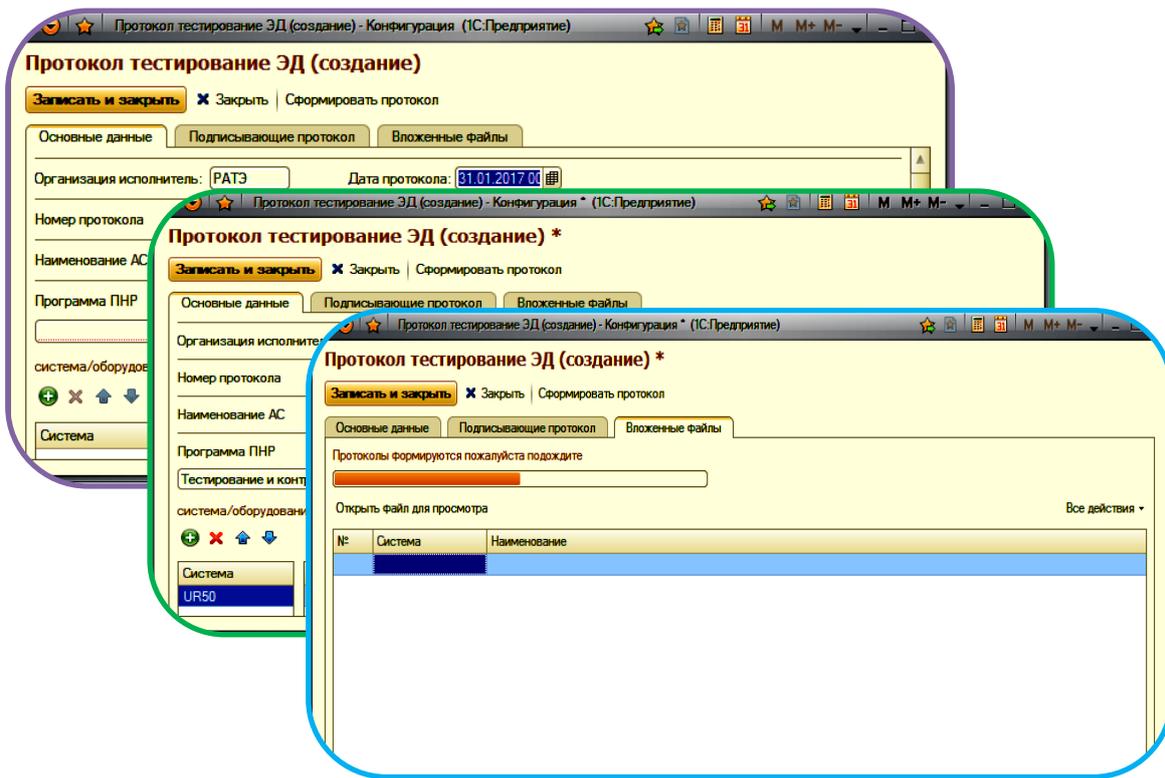


Рисунок 4 – Автоматизированное формирование диагностических протоколов [Automated generation of diagnostic protocols]

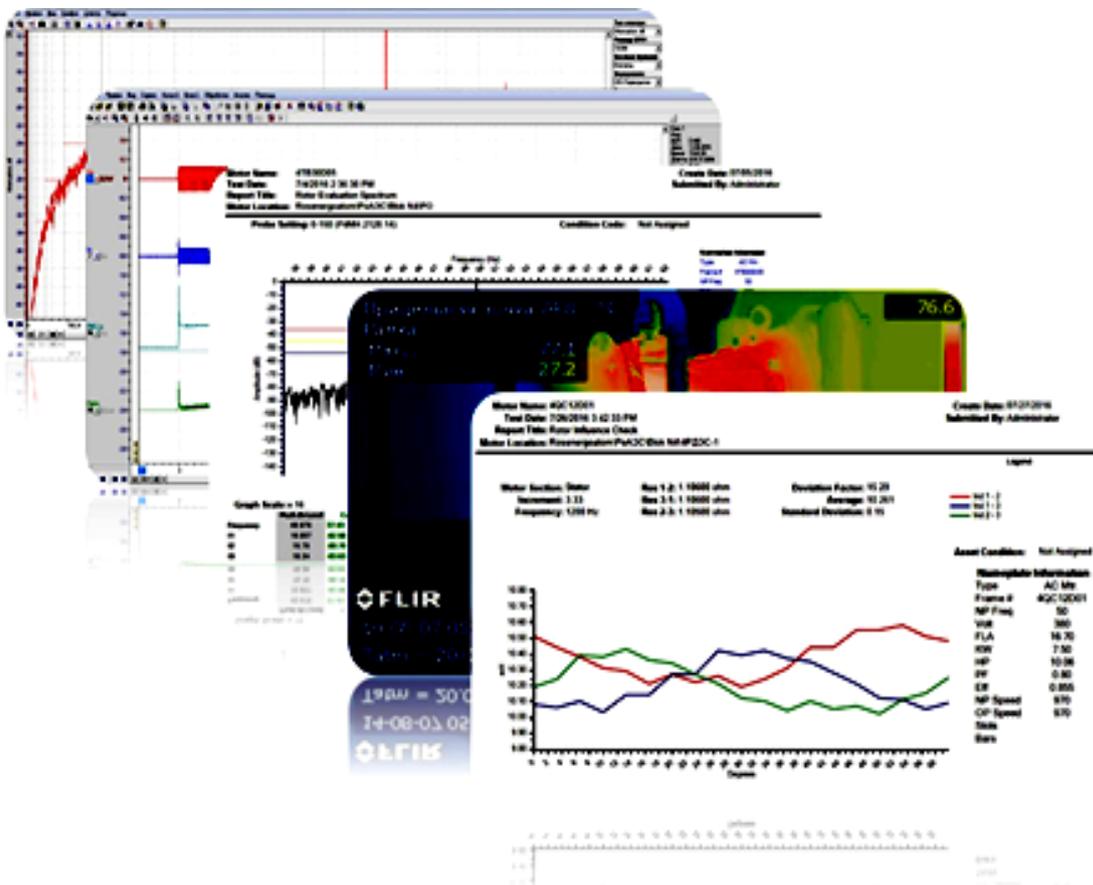


Рисунок 5 – Хранение в АССОДП данных разного типа [Storage of different data types in automated system for collecting and processing diagnostic parameters]

Количественная оценка ресурсных характеристик оборудования

Для принятия решения о корректировке межремонтного интервала, выводе оборудования из ремонта или для выдачи рекомендаций о досрочном проведении ремонта, изменении категории ремонта:

капитальный ремонт (КР) → средний ремонт (СР)/малый ремонт (МР)/техническое обслуживание (ТО), МР → СР/КР, МР → ТО и т.д.

недостаточно удовлетворительной или неудовлетворительной оценки технического состояния технологического оборудования в текущий момент времени. Необходима количественная оценка ресурсных характеристик, формирующая прогноз технического состояния на определённый период работы агрегата.

Таким образом, современной информационной системе управления ресурсом необходима встроенная поддержка функции прогнозирования технического состояния оборудования.

Силами специалистов «Ростоватомтехэнерго» в АССОДП создан модуль оценки ресурсных характеристик. В настоящее время в нем реализован алгоритм детерминированного прогнозирования (рис. 6) на основе регрессионного моделирования [9].

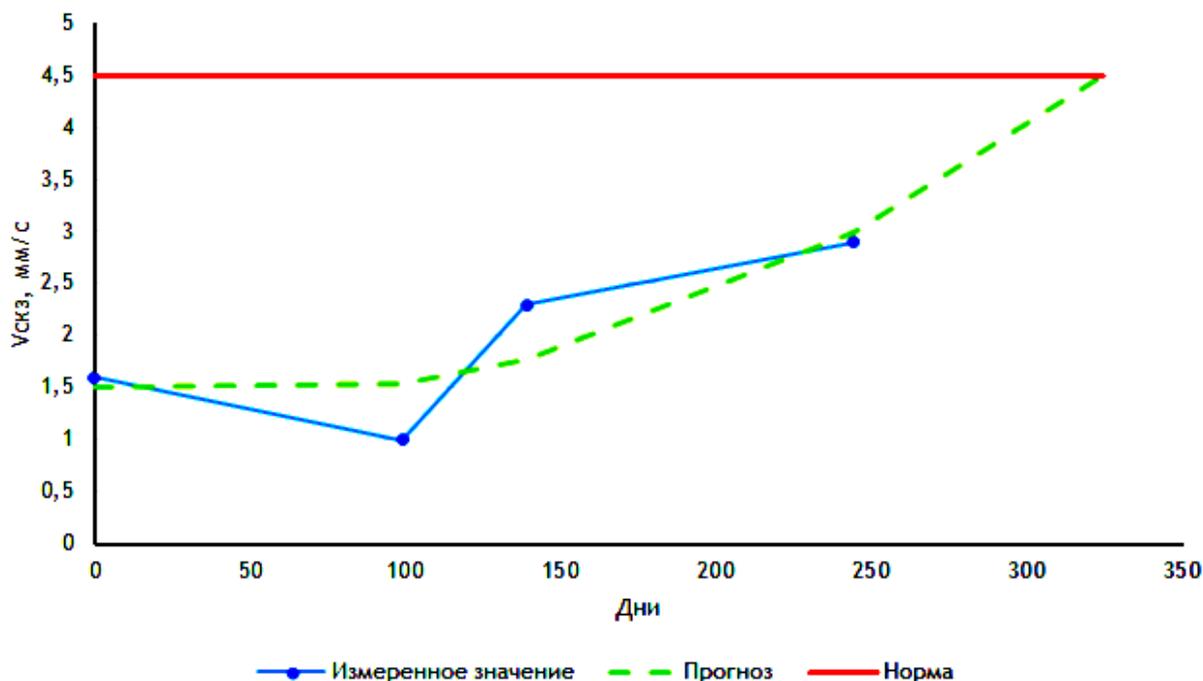
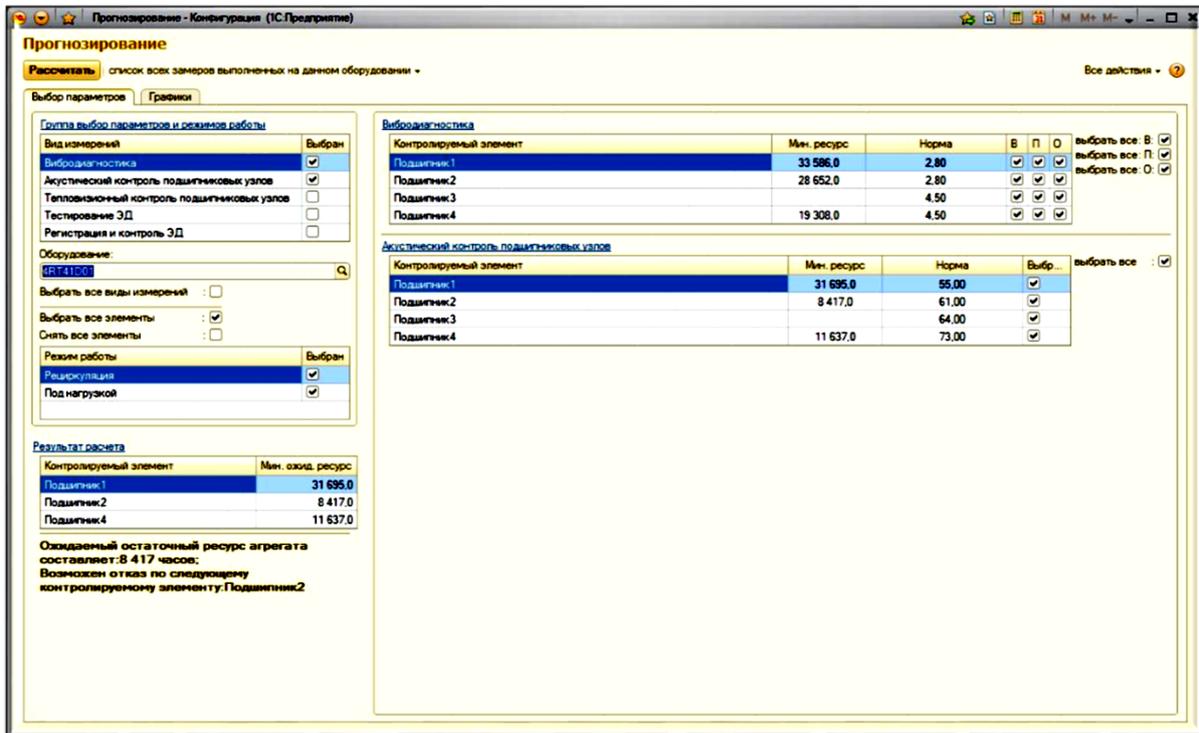


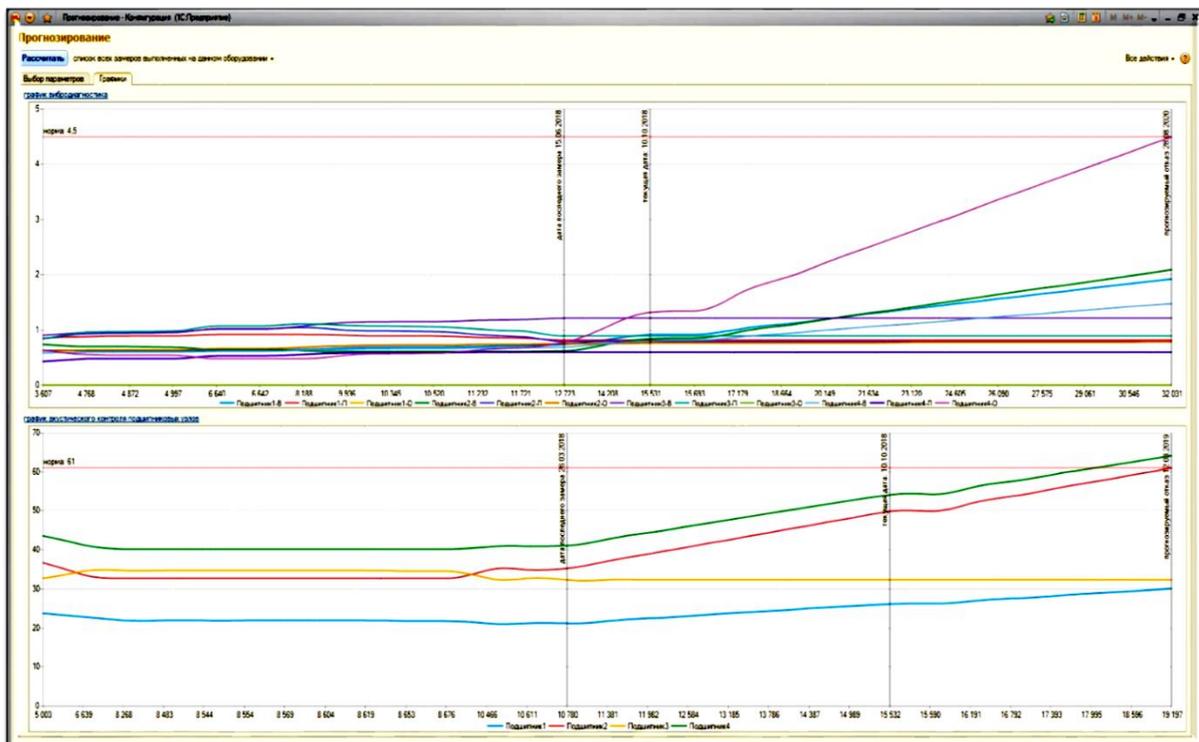
Рисунок 6 – Прогнозирование технического состояния в среде АССОДП методом квадратичной регрессии (детерминированный подход) [Prediction of the technical condition in the automated system for collecting and processing diagnostic parameters by the method of quadratic regression (deterministic approach)]

Реализация интерфейса вывода результатов прогнозирования остаточного ресурса приведены на рисунке 7.

В дальнейшем модуль расчета ресурсных характеристик будет дополнен более совершенными методами стохастического прогнозирования [10-12], основанными на вероятностных оценках анализируемой выборки значений ресурсных параметров (рис. 8).



а)



б)

Рисунок 7 – Интерфейс модуля прогнозирования ресурсных характеристик в АССОДП: а) табличная форма, содержащая входную и выходную информацию прогнозирования технического состояния; б) графическая визуализация результатов расчета остаточного ресурса [The interface of the module for predicting resource characteristics in an automated system for collecting and processing diagnostic parameters: a) a tabular form containing the input and output information for predicting the technical condition; b) graphical visualization of the results of calculating the residual resource]

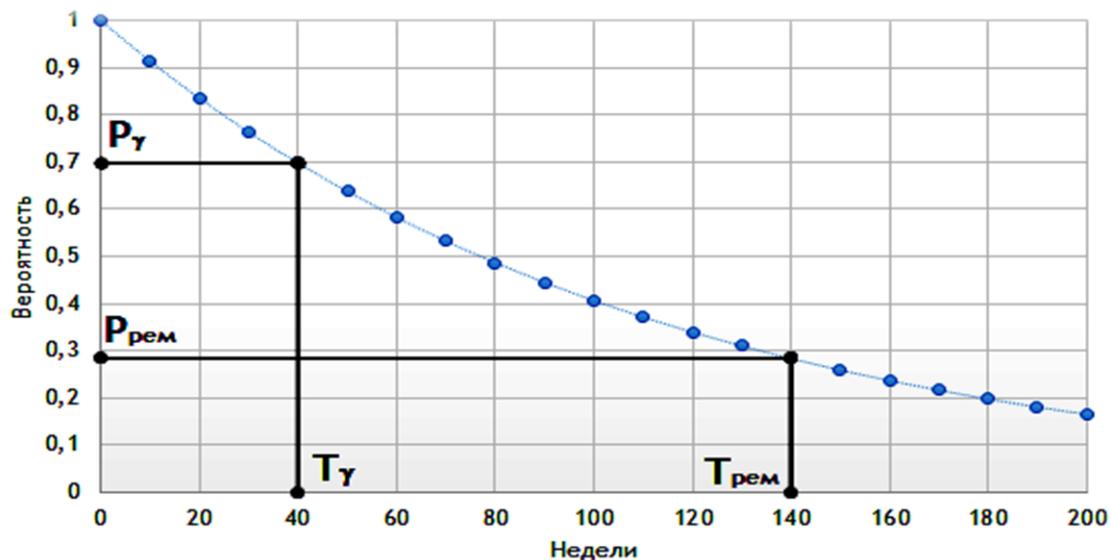


Рисунок 8 – Стохастическое прогнозирование методами теории вероятности:

P_γ – вероятность безотказной работы оборудования, T_γ – γ -процентный ресурс оборудования, $P_{\text{рем}}$ – вероятность безотказной работы оборудования за время $T_{\text{рем}}$, оставшееся до очередного планового ремонта [Stochastic forecasting by probability theory methods: P_γ is the probability of equipment failure-free operation, T_γ is the equipment γ -percent life, $P_{\text{рем}}$ is the probability of equipment failure-free operation during the time $T_{\text{рем}}$ remaining until the next scheduled repair]

Выводы

1. Применение АССОДП на опыте проведения пусконаладочных работ при вводе в эксплуатацию энергоблоков №3 и №4 Ростовской АЭС, позволило осуществить переход от традиционного метода вибродиагностики насосного оборудования к совершенно новому качественному уровню оценки и прогнозирования технического состояния, повысить точность диагноза дефектного оборудования, тем самым практически исключить повторные пуски агрегатов для уточнения причин повышенной вибрации и определения технического состояния оборудования.

2. Система АССОДП является практической реализацией эффективных диагностических методов прогнозирования и предупреждения технологических нарушений эксплуатации оборудования АЭС на основе обработки ресурсных параметров [8,9].

3. Реализация АССОДП является первым шагом в направлении полноценной реализации стратегии ТОиР оборудования по фактическому ТС [4,7], как одна из первых систем, имеющих модуль прогнозирования ТС оборудования.

4. Решение задачи прогнозирования ТС оборудования должно реализовываться посредством обоснованного подбора диагностических параметров и назначения для них критериев, предиктивный анализ которых позволит с высокой степенью вероятности предсказывать ТС оборудования в будущем.

5. Система АССОДП представляет собой начальный этап цифровизации диагностического сопровождения эксплуатации.

6. Впоследствии АССОДП может быть модернизирована в «Информационную блочную систему технического диагностирования», собирающую данные не только с портативных приборов, но и датчиков АСУТП, автоматически анализирующую параметры и выдающую рекомендации и уведомления/предупреждения оперативному персоналу АЭС. Т.е. АССОДП имеет потенциал трансформации в цифровую платформу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД ЭО 0039-95. Нормативно-методологические требования к управлению ресурсными характеристиками элементов энергоблоков АС. – Москва, 1997. – URL : http://www.snti.ru/snips_rd3.htm.
2. РД ЭО 0096-98. Типовое положение по управлению ресурсными характеристиками элементов энергоблоков АС / ОАО «Концерн Росэнергоатом». – Москва, 1998. – URL : http://www.snti.ru/snips_rd3.htm.
3. РД ЭО 1.1.2.01.0769-2008. Организация ремонта оборудования атомных станций по техническому состоянию. Основные положения / ОАО «Концерн Росэнергоатом». – Москва, 2008. – URL : http://www.snti.ru/snips_rd3.htm.
4. *Ташлыков, О. Л.* Ремонт оборудования атомных станций / О. Л. Ташлыков. – Екатеринбург : Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2018. – 352 с.
5. *Воробьев, В. А.* Эксплуатация и ремонт электрооборудования и средств автоматизации / В. А. Воробьев. – Москва : Юрайт, 2017. – 338 с.
6. СТО 1.1.1.01.007.0281-2010. Управление ресурсными характеристиками элементов энергоблоков атомных станций / ОАО «Концерн Росэнергоатом». – Москва, 2010. – URL : https://standartgost.ru/g/pkey-14293819162/%D0%A1%D0%A2%D0%9E_1.1.1.01.007.0281-2010.
7. СТО 1.1.1.01.0069-2017. Правила организации технического обслуживания и ремонта систем и оборудования атомных станций / ОАО «Концерн Росэнергоатом». – Москва, 2017. – URL : <https://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/376/37644e5aa93eec0702537d60b9511e84.pdf>.
8. *Сальников, А. А.* Прогнозирование и предотвращение технологических нарушений эксплуатации оборудования АЭС : автореферат диссертации кандидата технических наук / А.А. Сальников. – Волгодонск, 2016. – 25 с.
9. РД 26.260.004-91. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации. – Москва: Издательство НИИХИММАШ, 1992. – 50 с. – URL : <https://files.stroyinf.ru/Data1/9/9239/>.
10. *Дорохов, А. Н.* Обеспечение надежности сложных технических систем / А. Н. Дорохов, В. А. Керножицкий, А. Н. Миронов. – Москва : Лань, 2017. – 352 с.
11. *Стельмашонок, Е. В.* Моделирование процессов и систем / Е. В. Стельмашонок [и др.]. – Москва : Юрайт, 2017. – 289 с.
12. *Алпатов, Ю. Н.* Математическое моделирование производственных процессов / Ю. Н. Алпатов, Т. С. Спирина. – Москва : Лань, 2018. – 136 с.

REFERENCES

- [1] RD E`O 0039-95. Normativno-metodologicheskie trebovaniya k upravleniyu resursny`mi karakteristikami e`lementov e`nergoblokov AS [RD EO 0039-95. Regulatory and Methodological Requirements for the Resource Characteristics Management of Power Unit Elements]. Moscow. 1997. – URL : http://www.snti.ru/snips_rd3.htm (in Russian).
- [2] RD E`O 0096-98. Tipovoe polozhenie po upravleniyu resursny`mi karakteristikami e`lementov e`nergoblokov atomny`x stancij [RD EO 0096-98. Standard Provision on Resource Characteristics Management of Elements of Power Units of Nuclear Power Plants]. ОАО «Koncern Rose`nergoatom» [«Concern Rosenergoatom» JSC]. Moscow. 1998. – URL : http://www.snti.ru/snips_rd3.htm (in Russian).
- [3] RD E`O 1.1.2.01.0769-2008. Organizaciya remonta oborudovaniya atomny`x stancij po texnicheskomu sostoyaniyu. Osnovny`e polozheniya [RD EO 1.1.2.01.0769-2008. Organization of Equipment Repair of Nuclear Power Plants According to Technical Condition. Fundamentals]. ОАО «Koncern Rose`nergoatom» [«Concern Rosenergoatom» JSC]. Moscow. 2008. – URL : http://www.snti.ru/snips_rd3.htm (in Russian).
- [4] Tashlykov O.L. Remont oborudovaniya atomny`x stancij [Repair of Nuclear Power Plant Equipment]. Ekaterinburg. Ural`skij federal`nyj universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El`cina [Yekaterinburg. Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin]. 2018. 352 p. (in Russian).
- [5] Vorobyov V.A. E`kspluatatsiya i remont e`lektrrooborudovaniya i sredstv avtomatizacii [Operation and Repair of Electrical Equipment and Automation]. Moscow : Yurayt. 2017. – 338 p. (in Russian).

- [6] STO 1.1.1.01.007.0281-2010. Upravlenie resursny`mi xarakteristikami e`lementov e`nergoblokov atomny`x stancij. OAO «Koncern Rose`nergoatom» [STO 1.1.1.01.007.0281-2010. Management of Resource Characteristics of Power Unit Elements of Nuclear Power Plants. «Concern Rosenergoatom» JSC]. Moscow. 2010. URL : https://standartgost.ru/g/pkey-14293819162/%D0%A1%D0%A2%D0%9E_1.1.1.01.007.0281-2010 (in Russian).
- [7] STO 1.1.1.01.0069-2017. Pravila organizacii texnicheskogo obsluzhivaniya i remonta sistem i oborudovaniya atomny`x stancij / OAO «Koncern Rose`nergoatom» [STO 1.1.1.01.0069-2017. Organization Rules of Maintenance and Repair of Systems and Equipment of «Concern Rosenergoatom» nuclear power plants]. Moscow. 2017. URL : <https://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/376/37644e5aa93eec0702537d60b9511e84.pdf> (in Russian).
- [8] Sahnikov A.A. Prognozirovanie i predotvrashhenie texnologicheskix narushenij e`kspluatacii oborudovaniya AE`S: avtoreferat dissertacii kandidata texnicheskix nauk [Forecasting and Prevention of Technological Breakdowns in the Operation of Nuclear Power Plant Equipment: thesis abstract of PhD in Engineering]. Volgodonsk. 2016. 25 p. (in Russian).
- [9] RD 26.260.004-91. Prognozirovanie ostatochnogo resursa oborudovaniya po izmeneniyu parametrov ego texnicheskogo sostoyaniya pri e`kspluatacii [RD 26.260.004-91. Prediction of Residual Life of the Equipment to Change the Parameters of its Technical Condition during Operation]. Moscow: NIIXIMMASH. 1992. 50 p. URL : <https://files.stroyinf.ru/Data1/9/9239/> (in Russian).
- [10] Doroxov A.N., Kernozhiczkiy V.A., Mironov A.N. Obespechenie nadezhnosti slozhny`x texnicheskix sistem [Ensuring the Reliability of Complex Technical Systems]. Moscow: Lan. 2017. 352 p. (in Russian).
- [11] Stelmashonok E.V. Modelirovanie processov i sistem [Modeling of Processes and Systems]. Moscow. Yurajt. 2017. 289 p. (in Russian).
- [12] Alpatov Yu.N., Spirina T.S. Matematicheskoe modelirovanie proizvodstvenny`x processov [Mathematical Modeling of Production Processes]. Moscow: Lan. 2018. 136 p. (in Russian).

Automation of Collection and Processing of Equipment Diagnostic Parameters of New NPP Units

Z.O. Kavrishvili¹, V.L. Rachkov²

Rostov branch «Rostovatomtechenego» of JSC «Atomtechenego», Volgodonsk-28, Rostov region, Russia 347388

¹*ORCID ID: 0000-0002-9185-0785*

e-mail: zokavrishvili@roate.ru

²*ORCID ID: 0000-0003-3710-3153*

e-mail: vlrachkov@roate.ru

Abstract – Modern technical diagnostics allows to inspect equipment by numerous methods of non-destructive control, which complement each other and increase the veracity of the technical condition grade. The combination of large quantity of diagnostic data and different diagnostic methods go to the need to integrate diagnostic information streams in a single information system which automates the collection and processing of diagnostic parameters. The specialists of “Rostovatomtekhenergo” designed and implemented the information system with the necessary properties.

Keywords: automated system, diagnostic parameters, equipment diagnostics, equipment of NPP power units.

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

УДК 378.22:351.862.6

**КАСТОМИЗИРОВАННЫЕ УЧЕБНЫЕ КУРСЫ ДЛЯ МАГИСТРОВ
КАК ФАКТОР КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ КАДРОВ
ДЛЯ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

© 2019 М.В. Головки *, И.В. Судилова **, А.В. Анцибор *

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

***Группа компаний «Промойл», Пермь, Россия*

В работе определены основные тенденции развития экономики и связанные с ними изменения требований промышленных предприятий к компетенциям будущих специалистов. Рассмотрены возможности формирования метакомпетенций, soft-skills у магистрантов, как потенциальных генераторов новых идей на предприятиях. В основе инновационного компонента курса лежит кастомизация курса и курирование контента. Использование информационных технологий не только сделает учебный материал более доступным для слушателей, но и позволит работодателям принимать активное участие в его формировании и своевременной модернизации.

Ключевые слова: soft-skills, кастомизированный курс, магистратура, Фонд В. Потанина, компетенции, атомная отрасль.

Поступила в редакцию 09.08.2019

После доработки 23.08.2019

Принята к публикации 04.09.2019

Мейнстримом экономики будущего является ускорение и изменение. В современном турбулентном мире постоянно сокращается число фиксированных профессий, и все большее значение приобретают ситуативные роли, которые человек станет занимать в процессе реализации коллективных и индивидуальных целей.

Современные предприятия, входящие в контур Госкорпорации по атомной энергии «Росатом», ориентированы на технологическое лидерство и рост конкурентоспособности за счет новых продуктов и услуг [1, 2]. В связи с этим они испытывают острую потребность в молодых специалистах, подготовленных к работе в условиях быстро меняющегося технологического уклада. В образовательном сообществе набирает популярность новый список грамотностей, называемый «4К»: коммуникация, креативность, критическое мышление и командная работа (рис. 1). При этом особое значение приобретают soft-skills – навыки междисциплинарного, системного характера, преимущества которых в последние годы активно обосновываются представителями научного сообщества [3-7].

Сохраняется разобщенность траекторий развития реального сектора экономики и образовательных организаций. Это приводит, во-первых, к несоответствию спроса и предложения на рынке труда. Во-вторых, к неактуальности НИР вуза для бизнеса, что увеличивает инновационный лаг и затрудняет коммерциализацию. Эффективным инструментом устранения указанных противоречий может стать разработка корпоративных магистерских программ. Это позволит приблизить вузовскую науку к

экономике и получить актуальные исследовательские ориентиры, а также работать «на опережение» в сфере подготовки специалистов «soft-skills», адаптированных к работе в условиях быстро меняющегося технологического уклада [8-10]. Корпоративные магистерские программы – это новый интерфейс работы технологического бизнеса с университетами.

Развитие и укрепление традиционных форматов взаимодействия университетов с технологическим бизнесом должно идти в направлении выстраивания согласованных и взаимосвязанных стратегий, ориентированных на постоянную адаптацию к меняющимся условиям и в сфере экономики, и в сфере образования. Интерес для бенчмаркинга могут представлять практики ВИТИ НИЯУ МИФИ: программа развития и образовательные программы вуза согласованы и проходят обязательную экспертизу основными предприятиями-работодателями, функционирует ресурсный центр «ГК «Росатом»-НИЯУ МИФИ», центр профессиональных компетенций при крупном промышленном партнере – Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, научно-исследовательский институт проблем атомного энергомашиностроения, МНПК «Безопасность ядерной энергетики» (глубина архива – 15 лет), журнал «Глобальная ядерная безопасность», индексируемый в международных репозиториях (рис. 2). Ежегодно студенты принимают участие в конкурсах инновационных проектов, инициируемых, в т.ч. промышленными предприятиями (ТеМП, «Зеленый квадрат», У.М.Н.И.К. и пр.) [11-13].



Рисунок 1 – Структура модели «4К» [«4K» model structure]

Указанные преимущества позволили команде профессионалов из ВИТИ НИЯУ МИФИ войти в число победителей конкурса на получение гранта для преподавателей магистратуры, организованного Благотворительным фондом В. Потанина, на разработку учебного курса с инновационным компонентом [14]. Как известно, эффективность инноваций – в хороших традициях. Предлагаемый новый учебный курс для магистратуры основан на корпоративном практико-ориентированном подходе к разработке и реализации, а также на использовании омниканального формата для адаптивности взаимодействия студентов и преподавателя в условиях информационной экономики. Основой успеха реализации учебного курса является тесное взаимодействие с промышленными предприятиями с целью выявления изменений в требованиях к компетенциям молодых специалистов и их своевременного отражения в образовательных программах, с целью интеграции актуальных производственных задач в программы практических занятий. Это позволит предприятиям получить специалиста, более адаптированного к производственной специфике и требующего меньше времени на коучинг, совершающего меньше ошибок (что влияет на экономическую эффективность, в том числе).

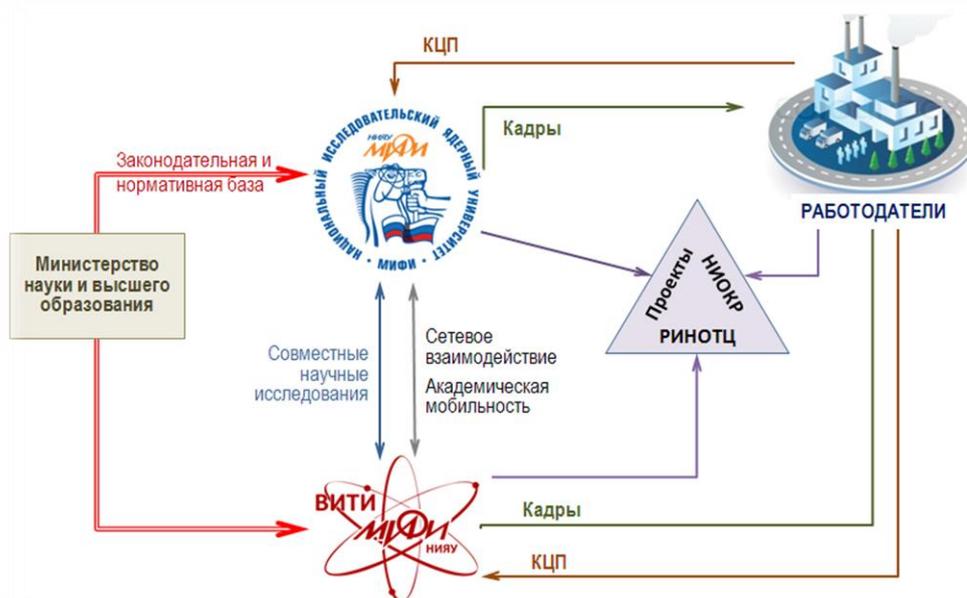


Рисунок 2 – Модель взаимодействия вузов и промышленных предприятий на примере кейса НИЯУ МИФИ и ВИТИ НИЯУ МИФИ [The model of interaction between universities and industrial enterprises on the example of the case of NRNU MEPhI and VETI NRNU MEPhI]

Предлагаемый проект ориентирован на создание нового кастомизированного курса «Экономика и управление высокотехнологичными инновационными проектами» для магистрантов, интегрирующего содержательную часть трех дисциплин «Управление инновациями», «Управление проектами» и «Маркетинг и менеджмент машиностроительного предприятия». Цель – формирование у магистрантов метакомпетенций, позволяющих стать востребованными специалистами, способными эффективно решать задачи развития реального сектора экономики на основе наукоемких технологий. Отраслевая специфика курса достигается активным участием предприятий ГК Росатом (машиностроительный и электроэнергетический дивизионы), а также машиностроительного кластера.

Студент приобретает компетенции формата «softskills», позволяющие ему разрабатывать стартапы в сфере высоких технологий, оценивать не только

техническую новизну предлагаемых проектов, но и экономическую эффективность и востребованность на рынке; использовать информационные технологии при разработке стратапов; презентовать идею различным группам стейкхолдеров.

Особенностью курса являются новые методики преподавания и способы взаимодействия преподавателя со студентом, благодаря которым обеспечивается высокий уровень его самоорганизации и саморазвития. Сегодня преподаватель становится «маркетологом» дисциплины, «коучером» – убеждает студента в том, что ее изучение необходимо (обозначить формируемые soft-skills и где они применимы) и предоставляет возможность удобного формата взаимодействия с ним, как с тренером. Результаты практических занятий носят прикладной характер, поскольку предполагают анализ реальных ситуаций, а принятые управленческие решения оцениваются работодателями. Предлагаемый омниканальный формат обучения соответствует ритму современной жизни и задействует способы и средства коммуникации, наиболее адаптивные в молодежной среде.

В основе предлагаемого курса лежит курирование контента – комплексный подход к управлению образовательным решением.

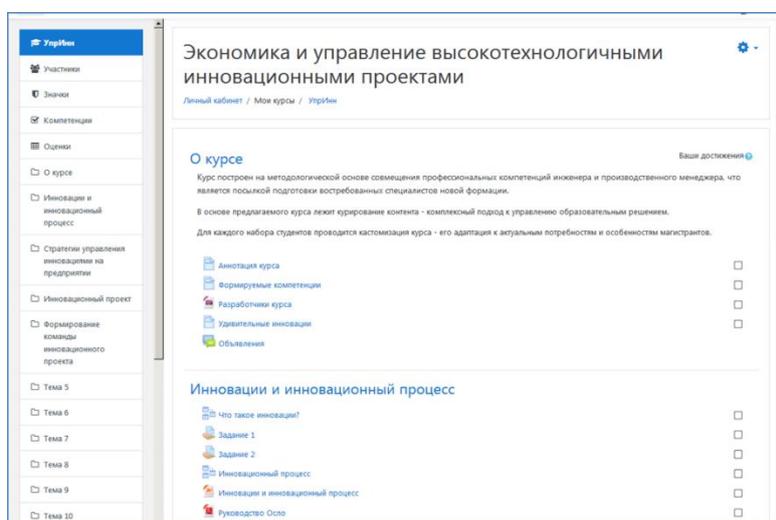
Для каждого набора студентов проводится кастомизация курса – его адаптация к актуальным потребностям и особенностям магистрантов.

Используются методики:

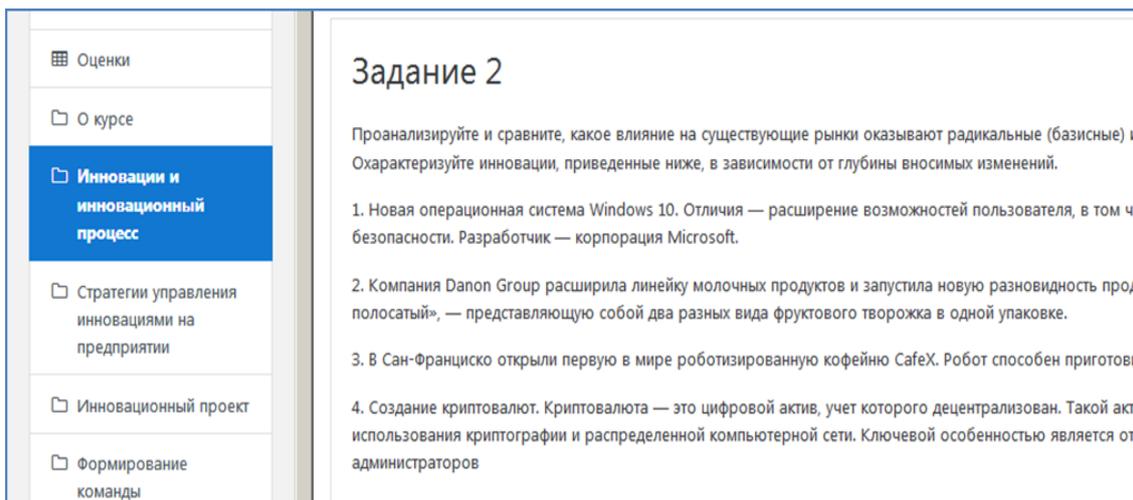
- омниканального обучения (вебинары, видео-конференции, эл. почта, мессенджеры);
- перевернутого класса;
- кастомизированные бизнес-симуляции, деловые игры и кейсы в рамках интересов наиболее востребованных для трудоустройства предприятий атомной отрасли.

Результаты, достигнутые разработчиками на данный момент, следующие:

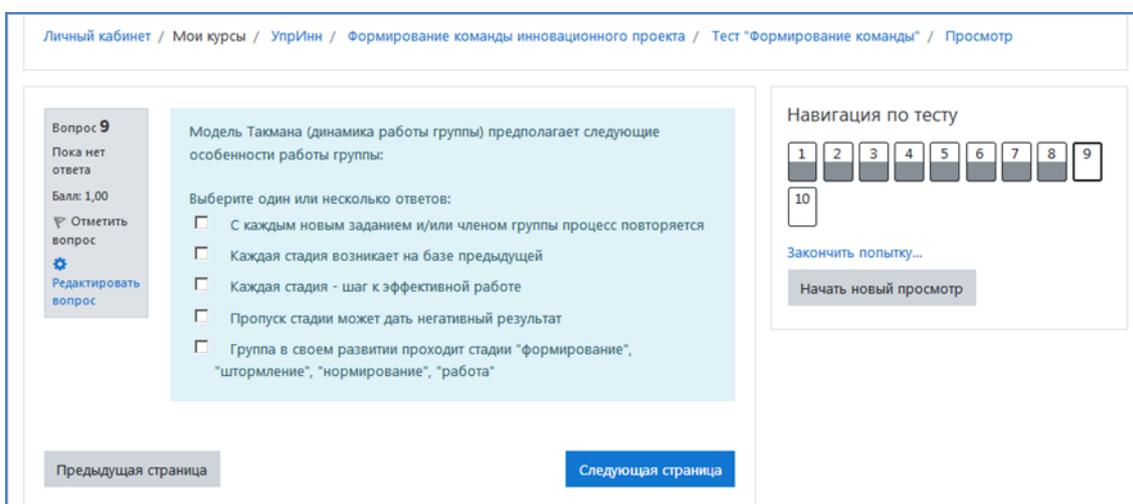
- разработан курс лекций (рис. 3а);
- по материалам, предоставленным предприятиями-партнерами, модернизируются сценарии практических занятий;
- ведется размещение материалов на портале дистанционного образования НИЯУ МИФИ (portai.mephi.ru/viti), позволяющего размещать учебные материалы и вести работу со студентами в режиме удаленного доступа (рис. 3а, б, в);
- создана страница курса в социальной сети Facebook, на которой будет организован форум для обсуждения вопросов курса (рис. 3г).



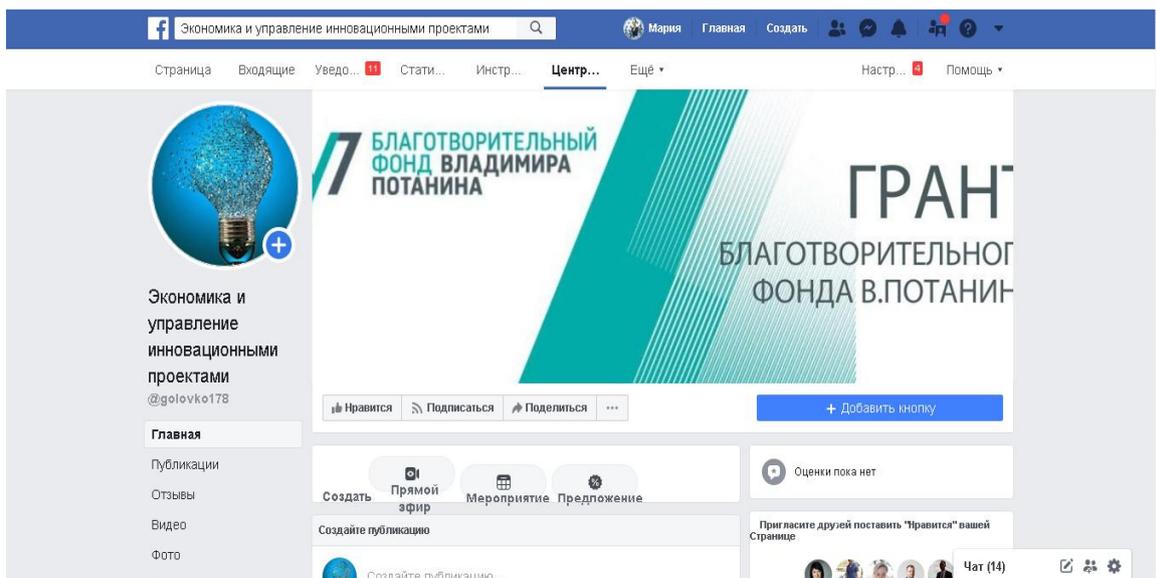
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3 – Структура кастомизированного курса «Экономика и управление высокотехнологичными инновационными проектами» в он-лайн формате [The structure of “Economics and Management of High-Tech Innovative Projects” online customized course]

Разрабатываемый курс ориентирован на формирование у магистрантов следующих компетенций:

- способность применять адаптивные подходы к управлению на всех этапах жизненного цикла инновационного проекта с использованием методов математического и системного анализа;

- способность к практическому использованию инструментария поддержки принятия решений на этапах жизненного цикла искусственных систем;

- способность выбирать методы исследования и анализа проблемных ситуаций, разрабатывать алгоритмы решения задач по разработке, внедрению и управлению сложными системами в различных отраслях;

- способность обеспечивать эффективное управление программами освоения новой продукции, проводить маркетинговые исследования и подготавливать бизнес-планы выпуска и реализации перспективных и конкурентоспособных изделий;

- способность разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности на предприятии, оценивать затраты и технико-экономическую эффективность проектирования, исследования, инновационные и технологические риски при внедрении новых технологий, координировать работу персонала при комплексном решении инновационных проблем на предприятиях.

В результате формирования указанных компетенций будет подготовлен новый класс специалистов, способных эффективно решать проблемы менеджмента в высокотехнологичных и наукоемких отраслях техники и технологий, в том числе на предприятиях атомной отрасли, обладающих значительным инновационным потенциалом и ориентированных на экспорт технологий, знаний и образования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руденко, В. А. К вопросу об эффективных практиках подготовки кадров для реализации экспортоориентированной стратегии ГК «Росатом» / В. А. Руденко, М. В. Головкин, Ю. А. Евдошкина, Н. П. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 1 (30). – С. 124-135.
2. Альстрэнд, Б. Школы стратегий. Стратегическое сафари: экскурсия по дебрям стратегий менеджмента / Б. Альстрэнд, Д. Лэмпел, Г. Минцберг. – Санкт-Петербург : Питер, 2000. – 416 с.
3. Мельников, О. Н. Анализ единства и отличий целевых функций управления «кадрами», «персоналом» и «человеческими ресурсами» современных предприятий / О. Н. Мельников, В. Г. Чибисова // Креативная экономика. – 2016. – № 3. – с. 307-320.
4. Сираева, М. М. К вопросу о содержании поликультурной компетенции студента вуза в условиях конструирования новых образовательных стандартов / М. М. Сираева // Пути внедрения идей компетентностного подхода в образовательную практику вуза : сборник научных статей. – Ижевск, 2011. – С. 97-100.
5. Питерская, А. Л. Многосторонняя форма коммуникации как фактор реализации компетентностного подхода в образовательном процессе / А. Л. Питерская, Е. В. Батеева, Е. С. Юлова // Гуманитарное образование в парадигме сложности : сборник научных статей. – Москва, 2016. – С. 56-67.
6. Причина, О. С. Профессиональные стандарты как ядро новой образовательной парадигмы / О. С. Причина, В. Д. Орехов, Е. С. Щенникова // Социально-политические науки. – 2017. – № 5. – С.46-51.
7. Орехов, В. Д. Прогнозирование развития человечества с учетом фактора знания : монография // В. Д. Орехов. – Жуковский : МИМ ЛИНК, 2015. – 210 с.
8. Орехов, В. Д. Измерение количества явных и неявных знаний / В. Д. Орехов // Вестник МИМ ЛИНК – № 3. – 2016. – С. 86-93.
9. Савельченко, И. А. Управление человеческими ресурсами в контексте стратегии развития интеллектуального капитала организации / И. А. Савельченко, Л. Е. Никифорова // Креативная экономика. – 2017. – Том 11. – № 7. – С. 735-748.
10. Никифорова, Л. Е. Методология стратегического управления организацией на основе развития интеллектуального капитала : автореферат диссертации на соискание ученой

- степени доктора экономических наук / Л. Е. Никифорова. – Новосибирск : Сибирская академия финансов и банковского дела, 2010. – 48 с.
11. Официальный сайт ВИТИ НИЯУ МИФИ. – URL : <http://www.viti-mephi.ru/> (дата обращения: 26.04.2019).
 12. Официальный сайт научно-практического журнала «Глобальная ядерная безопасность». – URL : <http://gns.mephi.ru/ru> (дата обращения: 26.04.2019).
 13. Официальный сайт ежегодной международной научно-практической конференции «Безопасность ядерной энергетики». – URL : <http://nps.viti-mephi.ru> (дата обращения: 26.04.2019).
 14. Благотворительный фонд В. Потанина. Студенческие стипендии и преподавательские гранты 2017/2018. – URL : <http://www.fondpotanin.ru/novosti/2018-03-16/38630163> (дата обращения: 16.03.2018).

REFERENCES

- [1] Rudenko V.A., Golovko M.V., Evdoshkina Yu.A., Vasilenko N.P. K voprosu ob e`ffektivny`x praktikax podgotovki kadrov dlya realizacii e`ksportoorientirovannoj strategii GK «Rosatom» [Effective Practices Training to Implement Export-Oriented Strategy of GK «Rosatom»]. Global'naya yadernaya bezopasnost` [Global nuclear safety]. 2019. № 1 (30). P. 124-135 (in Russian).
- [2] Al`stre`nd B., Le`mpel D., Minczberg G. Shkoly` strategij. Strategicheskoe safari: e`skursiya po debryam strategij menedzhmenta [School Strategies. Strategic Safari: a Tour of the Wilds of Management Strategies]. Sankt-Peterburg: Piter [St. Petersburg: Piter], 2000. 416 pp. (in Russian).
- [3] Mel`nikov O.N., Chibisova V.G. Analiz edinstva i otlichij celevy`x funkcij upravleniya «kadrami», «personalom» i «chelovecheskimi resursami» sovremenny`x predpriyatij [Analysis of Unity and Differences of Target Functions of Management of «Personnel» and «Human Resources» of Modern Enterprises]. Kreativnaya e`konomika [Creative Economy]. 2016. № 3. P. 307-320 (in Russian).
- [4] Siraeva M.M. K voprosu o sodержanii polikul`turnoj kompetencii studenta vuza v usloviyax konstruirovaniya novy`x obrazovatel`ny`x standartov [Content of Multicultural Competence of University Students in the Design of New Educational Standards]. Puti vnedreniya idej kompetentnostnogo podxoda v obrazovatel`nyu praktiku vuza : sbornik nauchny`x statej [Ways of Implementing the Ideas of Competence Approach in the Educational Practice of the University: collection of scientific articles]. Izhevsk, 2011. P. 97-100 (in Russian).
- [5] Pitserskaya A.L. Bateeva E.V., Yulova E.S. Mnogostoronnyaya forma kommunikacii kak faktor realizacii kompetentnostnogo podxoda v obrazovatel`nom processe [Multilateral Form of Communication as a Factor in the Implementation of the Competence Approach in the Educational Process]. Gumanitarnoe obrazovanie v paradigme slozhnosti : sbornik nauchny`x statej [Humanities education in the paradigm of complexity: collection of scientific articles]. Moskva [Moscow]. 2016. P. 56-67 (in Russian).
- [6] Prichina O.S., Orexov V.D., Shhennikova E.S. Professional`ny`e standarty` kak yadro novoj obrazovatel`noj paradigmy` [Professional Standards as the Core of New Educational Paradigm]. Social`no-politicheskie nauki [Social and Political Sciences]. 2017. № 5. P.46-51 (in Russian).
- [7] Orexov V.D. Prognozirovanie razvitiya chelovechestva s uchetom faktora znaniya : monografiya [Forecasting of Human Development Taking into Account the Factor of Knowledge: monograph]. Zhukovskiy: MIM LINK, 2015. 210 p. (in Russian).
- [8] Orexov V.D. Izmerenie kolichestva yavny`x i neyavny`x znaniy [Measuring the Amount of Explicit and Implicit Knowledge]. Vestnik MIM LINK. № 3. 2016. P. 86-93 (in Russian).
- [9] Savel`chenko I.A., Nikiforova L.E. Upravlenie chelovecheskimi resursami v kontekste strategii razvitiya intellektual`nogo kapitala organizacii [Human resources management in the context of the intellectual capital development strategy of the organization]. Kreativnaya e`konomika [Creative economy]. 2017. T. 11. № 7. P. 735-748 (in Russian).
- [10] Nikiforova L.E. Metodologiya strategicheskogo upravleniya organizaciej na osnove razvitiya intellektual`nogo kapitala : avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora e`konomicheskix nauk [Methodology of Strategic Management of the Organization Based on the Development of Intellectual Capital: thesis abstract of Doctor of Economic Sciences]. Novosibirsk:

- Sibirskaya akademiya finansov i bankovskogo dela [Siberian Academy of Finance and Banking]. 2010. 48 p. (in Russian).
- [11] Oficial'nyj sajt VITI NIYaU MIFI [The Official Website of the VETI National Research Nuclear University MEPHI]. URL: <http://www.viti-mephi.ru/> (in Russian).
- [12] Oficial'nyj sajt nauchno-prakticheskogo zhurnala «Global'naya yadernaya bezopasnost'» [Official website of the scientific and practical journal «Global nuclear safety»]. URL: <http://gns.mephi.ru/ru> (in Russian).
- [13] Oficial'nyj sajt ezhegodnoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Bezopasnost' yadernoj e'nergetiki» [Official website of the Annual International Scientific and Practical Conference «Nuclear Energy Safety»]. URL: <http://nps.viti-mephi.ru> (in Russian).
- [14] Blagotvoritel'nyj fond V. Potanina. Studencheskie stipendii i prepodavatel'skie granty` 2017/2018 [V. Potanin Charitable Foundation. Student Scholarships and Teaching Grants 2017/2018]. URL: <http://www.fondpotanin.ru/novosti/2018-03-16/38630163> (in Russian).

Customized Training Courses for Masters as a Factor of Nuclear Industry Personnel Competitiveness

M.V. Golovko^{1*}, I.V. Sudilovskaya^{2**}, A.V. Antsibor^{3*}

**Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University*

“MEPhI”, Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360

***«Promoil» group of companies, Khokhryakov St., 9, Perm, Russia 347360*

¹ORCID iD: 0000-0002-4835-9800

WoS Researcher ID: J-2461-2016;

e-mail: MVGolovko@mephi.ru

²e-mail: office@promoil.com

³ORCID iD: 0000-0002-1192-4554

WoS Researcher ID: K-6051-2018

e-mail: AVAntsibor@mephi.ru

Abstract – The paper identifies the main trends in the development of the economy and the related changes in the requirements of industrial enterprises to the competencies of future specialists. The possibilities of forming metacompetencies, soft-skills among undergraduates as potential generators of new ideas in enterprises are considered. The innovative component of the course is based on customization of the course and curation of content. The use of information technology will not only make educational material more accessible for students but also allow employers to take an active part in its formation and timely modernization.

Keywords: soft-skills, customized course, master's program, V. Potanin Foundation, competencies, nuclear industry.

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

УДК 378:351.862.6

**МЕСТО ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ В СТРАТЕГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГОСУДАРСТВА И
БИЗНЕСА**

© 2019 С.П. Агапова, Н.А. Ефименко, Н.И. Лобковская, Ж.С. Рогачева,
И.А. Ухалина

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

Актуальность работы обусловлена ответственностью образовательных организаций высшего образования в формировании высокопрофессионального кадрового потенциала страны. В статье определена роль и значение современного вузовского образования в стратегии обеспечения экономической безопасности государства и бизнеса. Обозначены задачи вуза в рамках двух основных направлений развития – практико-ориентированной подготовки и технологического прорыва. Междисциплинарность отмечается как фактор экономической эффективности технологических стартапов. Приведен кейс реализации стратегии развития ВИТИ НИЯУ МИФИ.

Ключевые слова: экономическая безопасность, компетенции, soft-skills, взаимодействие, предприятия, экономическая эффективность, образовательная организация.

Поступила в редакцию 28.08.2019

После доработки 02.09.2019

Принята к публикации 04.09.2019

Роль и значение современного вузовского образования в стратегии обеспечения экономической безопасности государства и бизнеса сложно переоценить. Формирование системы компетенций у будущего специалиста, отвечающей потребностям развития бизнеса в условиях жесткой конкуренции – задача сложная и требующая осуществления серьезных организационных изменений в образовательных организациях.

Проблема низкого уровня образования достаточно серьезно влияет на безопасность, т.к. более половины респондентов отметили ее как важную. В новой редакции стратегии экономической безопасности Российской Федерации, принятой Указом Президента РФ № 208 от 13 мая 2017 года предусмотрено развитие человеческого потенциала, как одного из направлений обеспечения экономической безопасности, основными задачами которого являются:

- совершенствование системы общего и профессионального образования на основе современных научных и технологических достижений;
- развитие системы непрерывного образования, в том числе с использованием механизмов государственно-частного партнерства;
- развитие национальной системы квалификаций, совершенствование квалификационных требований к работникам, информирование граждан о востребованных и новых профессиях;

© Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2019

- профессиональная ориентация граждан;
- снижение уровня бедности и имущественного неравенства населения;
- содействие эффективной занятости населения и мобильности трудовых ресурсов;
- совершенствование механизмов обеспечения экологической безопасности и сохранения благоприятной окружающей среды [1].

Решение указанных задач должно начинаться в образовательных организациях, готовящих специалистов по заданным работодателями компетенциям. В структуру компетентностной модели должны быть органично вплетены ценности, формирующие высокий уровень этики и культуры профессиональной деятельности, частным проявлением которой является культура экономической безопасности [2].

В рамках основного вектора социально-экономического развития государства высшее образование должно развиваться по двум важнейшим стратегическим направлениям: концентрация на практико-ориентированной подготовке и обеспечение технологического прорыва.

Первое направление – это практико-ориентированная подготовка кадров под конкретные требования предприятий-работодателей. В связи с этим недостаточно просто согласовывать компетентностные модели, рабочие учебные планы и т.п. Тесное взаимодействие с предприятиями-партнерами должно лечь в основу выработки такой стратегии обучения, которая позволит через 4-5 лет обучения сформировать у молодого специалиста навыки для обеспечения инновационного развития предприятия (навыки *soft-skills*, «надпрофессиональные» компетенции), а также даст возможность максимально быстро адаптироваться в профессиональной среде, сводя тем самым риски предприятия к минимуму. Эффективными инструментами здесь могут стать: корректировка дисциплин по выбору, практика на предприятиях, привлечение сотрудников предприятий к чтению курсов, ранняя профессиональная ориентация при обязательном участии предприятий, – в тех форматах, которые воспринимаются «поколением Z», наиболее адаптированным к современной технологической среде. Исследования инструментов формирования указанных компетенций, проблемы и перспективы разработки и применения новых стратегий развития образовательных организаций высшего образования на современном этапе получили достаточно широкое распространение [3-10, 12-14].

Второе направление развития образовательных организаций – это то, что было отмечено Президентом РФ на Российском Совете Ректоров – «растущий вклад высшей школы в науку, в создание новых технологий, в реализацию и обеспечение квалифицированными кадрами проектов самого разного уровня: от общенациональных до региональных и муниципальных» [9].

Сегодня перед вузами нового поколения (3.0) стоят задачи взаимодействия с новыми трендами: университетским (экономика знаний), технологическим (научный фронт), экономическим (коммерциализация инноваций) и социокультурным (интегратор в обществе). Одной из важнейших задач вуза является инициация новых научно-исследовательских проектов. Инструментами может служить создание научных групп, коллективов, в том числе на основе сетевого межвузовского взаимодействия, того же сотрудничества с предприятиями для выполнения заказов на научно-исследовательские работы, подготовки дипломных проектов в формате бизнес-планов реальных и востребованных проектов, например, при соруководстве выпускными квалификационными работами сотрудниками предприятий.

Экономической эффективности инновационных стартапов как потенциальных успешных высокотехнологичных компания будет способствовать их «выращивание» в вузах. Это позволит и корпоративному, и образовательному секторам наиболее полно

отвечать на вызовы реальной экономики, оставаться конкурентоспособными в долгосрочной перспективе и создавать основу технологического прорыва российской экономики.

Одним их эффективных внутривузовских инструментов может стать развитие междисциплинарных и мультидисциплинарных форматов обучения и научно-исследовательской деятельности (рис. 1), поскольку они:

- больше связаны с проблемами реального мира, которые по своей сути также междисциплинарны и их решение не может укладываться в рамки одной учебной дисциплины;
- дают больше научных открытий, чем монодисциплинарные;
- позволяют сгладить некоторые проблемы «образовательной трубы»;
- развивают сетевое взаимодействие и академическую мобильность, позволяя преодолевать «туземность» науки.

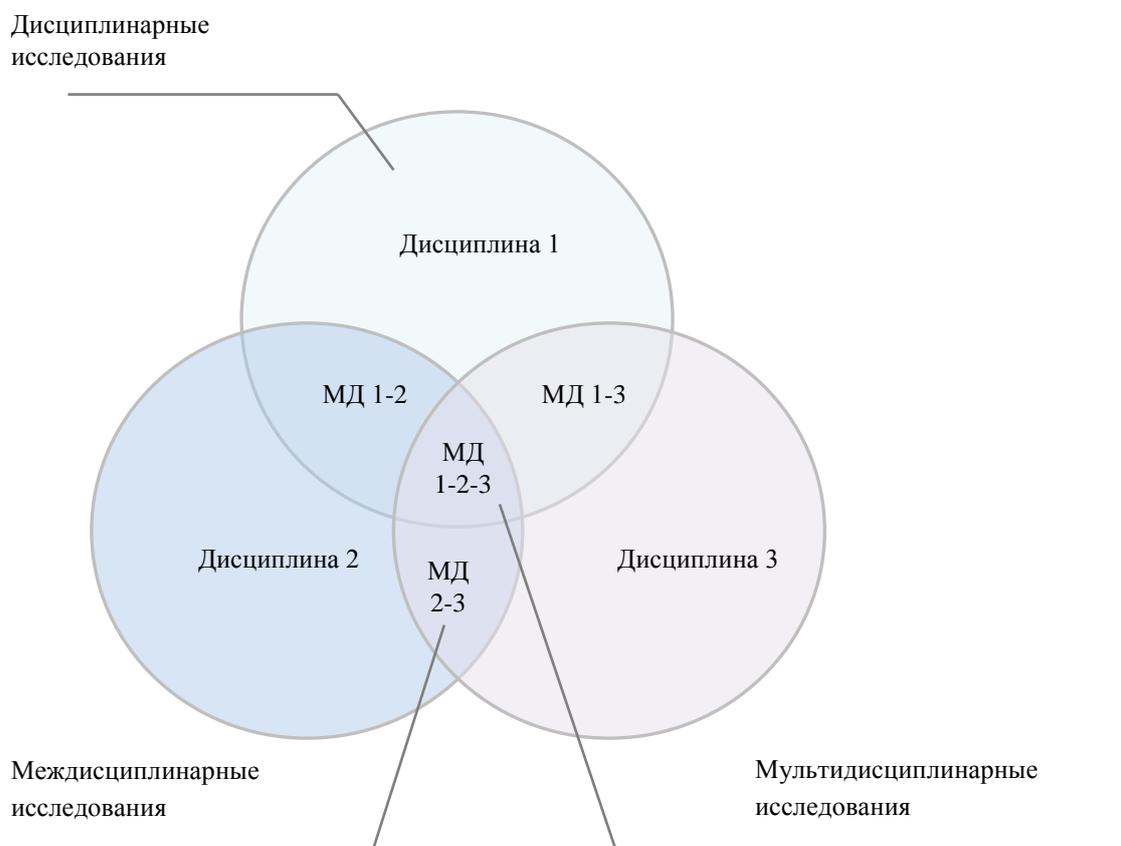


Рисунок 1 – Области междисциплинарных и мультидисциплинарных исследований [Areas of cross-disciplinary and multidisciplinary research]

Университетский менеджмент стремится развивать междисциплинарные исследования в связи с тем, что они больше всего отвечают проблемам современного мира, и, следовательно, позволяют готовить специалистов, ориентирующихся в актуальных вопросах своей профессиональной области. Именно поэтому, междисциплинарные исследования дают больше научных открытий, чем монодисциплинарные – решение той или иной научной задачи редко укладывается в рамки одной дисциплины, кода в паспорте научных специальностей. Данное утверждение не требует излишнего обоснования. Междисциплинарность

прослеживается в новых образовательных программах, сферах прикладных научно-исследовательских работ.

Анализу этой проблемы посвящено множество научных публикаций, выступлений на конференциях, семинарах. Однако, например, диссертации «на стыке» почему-то до сих пор не приветствуются диссертационными советами, а также продолжает сохраняться неэффективная, неактуальная дисциплинарная структура во многих российских университетах.

Междисциплинарные исследования можно развивать с помощью изменения организационной структуры университета, реорганизуя и/или создавая новые подразделения, отделы, департаменты, кафедры. Эти подразделения выполняют ряд значимых функций в университете: «вынимают» научно-педагогических работников из привычных дисциплинарных коллективов и заставляют их работать над междисциплинарными проблемами; позволяют постепенно институализировать новые для университета дисциплинарные направления, выделяя его на фоне конкурентов; создают площадку для коммуникации между различными дисциплинарными подразделениями.

Предлагаем рассмотреть проект междисциплинарной институции на примере кейса Волгодонского инженерно-технического института-филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (далее – ВИТИ НИЯУМИФИ). Согласно укреплению и развитию брендов, рассмотренных в [10], можно предложить создание научно-образовательного центра «Глобальная ядерная безопасность» на основе сетевого взаимодействия с другими филиалами в структуре вуза, осуществляющими подготовку для ядерного энергетического комплекса. Уникальность данной институции будет заключаться в подготовке T-shaped специалистов для ядерного энергетического комплекса за счет интеграции существующих брендов, а также развития сетевого взаимодействия с другими филиалами вуза, а также структурными подразделениями головной площадки (визитирующая профессура, центры коллективного пользования и т.п.). Целью создания данного центра будет создание современной, актуальной и гибкой системы подготовки и переподготовки квалифицированных кадров для ядерного энергетического комплекса и регионального промышленного кластера, а также формирование эффективной инновационной системы и реализации высокотехнологичных проектов для атомной отрасли на основе научно-образовательного и инновационного потенциала. Наиболее адаптивный тип междисциплинарности в данном примере – это мультидисциплинарность как использование нескольких дисциплин для исследования одной проблемы. Например, при подготовке инновационного решения в формате стартапа этот подход очень эффективен.

Междисциплинарность в целом лежит в основе проектного подхода. Действительно, любая идея требует обоснования не только с технической, но и с экономической точек зрения. Только тогда она заинтересует потенциального инвестора и может быть реализована. И только в совместной работе над проектом коллектив может достичь того необходимого согласия, о котором говорил Иван Бортник, советник генерального директора Фонда содействия инновациям: "Россияне знают все механизмы инновационного развития экономики, даже запустили их в действие, но необходимого темпа инновационного развития экономики нет и, похоже, не будет, так как между ними нет согласия» [11].

По мнению экс-главы Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», С.В. Кириенко, отрасли требуется экономика технических решений. Поэтому одна из задач организации проектного подхода – дать инженерам понимание экономической составляющей их деятельности. Каждое рационализаторское

предложение, конструкторская идея должна находить экономическое обоснование, приносить экономию или прибыль предприятию.

Реализация выбранного курса на инновационное развитие и эффективную практико-ориентированную подготовку в ВИТИ НИЯУ МИФИ осуществляется путем выстраивания эффективных форм взаимодействия с другими структурными подразделениями НИЯУ МИФИ, со стратегическими академическими единицами как центрами фундаментальных и прикладных исследований. Перспективные направления развития вуза, призванные реагировать на внешние факторы, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Перспективы развития ВИТИ НИЯУ МИФИ в рамках мультикампусного университета [Prospects of the VETI NRNU MEPHI development in the framework of a multi-campus university]

Факторы	Планируемые мероприятия
Регионально-дивизиональная структура ГК «Росатом»	Гибкая адаптация образовательных программ в соответствии с потребностями стейкхолдеров
Стратегия горизонтальной диверсификации формирования территориально-распределенной сети обучения ГК «Росатом»	Участие мультикампусного университета в решении задач практико-ориентированной подготовки на профильных предприятиях зарубежных студентов и преподавателей вузов стран-партнеров ГК «Росатом»
Цифровизация образования и экономики	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Увеличение числа MOOC-курсов, размещаемых в единой распределенной базе данных ✓ Создание «динамических блоков MOOC-курсов» (в соответствие с изменениями запросов конкретных предприятий) ✓ Формирование кастомизированных образовательных модулей за счет кроссфункционального и кроссдисциплинарного взаимодействия субъектов мультикампусного университета
Развитие движения WorldSkills/AtomSkills	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Внедрение и развитие гибких образовательных технологий с использованием методик WorldSkills для сокращения адаптационного периода выпускников на предприятиях ГК «Росатом» ✓ Формирование пула экспертов из числа преподавателей мультикампусного университета с целью распространения передовых образовательных технологий ✓ Привлечение экспертов-работодателей к проведению общественно-профессиональной аккредитации основных образовательных программ
Усиление роли и повышения статуса вуза в социально-экономическом развитии территории	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Формирование комфортной образовательной среды для инновационной и креативной деятельности студентов с целью подготовки специалистов нового типа для атомной энергетики ✓ Интеграция филиала в стратегию ГК «Росатом» по развитию «атомных городов» ✓ Профориентационная работа с целью поэтапного формирования профессионального самоопределения ✓ Участие в стратегическом развитии территории через взаимодействие с предприятиями-работодателями

Разработанные направления развития взаимодействия вуза с предприятиями станут основой эффективной подготовки специалистов, отвечающих требованиям экономической безопасности бизнеса и государства в современной нестабильной внешней среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента Российской Федерации от 13 мая 2017 года №208 «О Стратегии экономической безопасности Российской Федерации на период до 2030 года». – URL : <https://rg.ru/2017/05/15/prezident-ukaz208-site-dok.html>.
2. Головкин, М. В. Культура экономической безопасности как основной принцип разработки корпоративной политики противодействия теневым транзакциям (на примере предприятий

- ГК «Росатом») / М. В. Головкин, В. А. Плотников // Безопасность ядерной энергетики: тезисы докладов XV Международной научно-практической конференции, 06-07 июня 2019 г., ВИТИ НИЯУ МИФИ. – Волгоград : [б. и.], 2019. – 1 электрон. опт. диск (CD)
3. *Плаксий, С. И.* Стратегия развития российских вузов / С. И. Плаксий // Высшее образование XXI века. – 2006. – № 4. – С. 15-22.
 4. Стратегии адаптации высших учебных заведений: экономический и социологический аспекты / под редакцией Т. Л. Клячко. – Москва, 2002. – 220 с.
 5. *Кехян, М. Г.* Необходимость разработки стратегии инновационного развития вуза в условиях инновационной экономики // Наука, техника и образование. – 2015. – № 7 (13). – С. 59-61.
 6. *Беляева, Г. Д.* Стратегические приоритеты развития вуза в составе инновационного кластера / Г. Д. Беляева, А. Б. Макарец, Г. А. Федоренко // Управление экономическими системами. – 2013. – № 3.
 7. *Ворошилова, Л. Л.* Инновации и конкурентоспособность вуза на рынке образовательных услуг / Л. Л. Ворошилова // Российское предпринимательство. – 2002. – № 11 (35). – С. 76-81.
 8. *Берегова, Г. М.* Стратегия развития инновационной образовательной деятельности высших учебных заведений / Г. М. Берегова, Ю. Ю. Милова // Вестник ИрГТУ. – 2014. – № 11 (94). – С. 265-270.
 9. *Щербаков, В. П.* Высшее образование в инновационном развитии Иркутской области / В. П. Щербаков // Инновационный педагогический, методический, информационный, дидактический журнал. – 2010. – № 4 (9). – С. 33-35.
 10. Университет в современном обществе: стратегия инновационного развития: коллективная монография / Г. И. Лазарев [и др.]. – Владивосток : Издательство ВГУЭС, 2011. – 308 с.
 11. Стенографический отчет о пленарном заседании съезда Российского союза ректоров (выступление Путина В. В.). – URL : www.profcom.istu.ru/prof/files/30.04.2018_putin_na_sezde_rektorov.doc (дата обращения: 24.05.2019).
 12. *Лобковская, Н. И.* Особенности проектирования воспитательного процесса в условиях социально-образовательного пространства технического института / Н. И. Лобковская, А. В. Железнякова, Ю. А. Евдошкина // Современное образование. – 2017. – № 2. – URL : https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=23278DOI: 10.25136/2409-8736.2017.2.23278
 13. *Руденко, В. А.* К вопросу об эффективных практиках подготовки кадров для реализации экспортоориентированной стратегии ГК «Росатом» / В. А. Руденко, М. В. Головкин, Ю. А. Евдошкина, Н. П. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 1 (30). – С. 124-135.
 14. *Магомедбеков, Г. У.* Разработка и применение инновационной прогнозной модели экономического развития региона / Г. У. Магомедбеков, М. М. Амирова, З. К. Пайзуллаева // Фундаментальные исследования. – 2016. – №1. – URL : <https://fundamental-research.ru/pdf/2016/11-5/41298.pdf> (дата обращения: 24.0.2019).

REFERENCES

- [1] Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 13 maya 2017 goda №208 «O Strategii e`konomicheskoy bezopasnosti Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda [Presidential Decree No. 208 of 13 May 2017 The Economic Security Strategy of the Russian Federation for the period up to 2030]. URL : <https://rg.ru/2017/05/15/prezident-ukaz208-site-dok.html> (in Russian).
- [2] Golovko M.V. Plotnikov V.A. Kul`tura e`konomicheskoy bezopasnosti kak osnovnoj princip razrabotki korporativnoj politiki protivodejstviya tenevy`m transakciyam (na primere predpriyatij GK «Rosatom») [Culture of Economic Security as the Basic Principle of Formulating Corporate Policy of Combating the Informal Transactions (on the Example of the Rosatom Enterprises)]. Bezopasnost` yadernoj e`nergetiki: tezisy` dokladov XV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, 06-07 iyunya 2019 g., VITI NIYaU MIFI. – Volgondsk : [b. i.], 2019. – 1 e`lektron. opt. disk (CD) [Nuclear Energy Safety: abstracts of XV International Scientific-Practical Conference, 06-07 June 2019, VETI NRNU MEPhI. Volgondsk: [B. I.], 2019. 1 CD)] (in Russian).
- [3] Plaksij S.I. Strategiya razvitiya rossijskix vuzov [The Development Strategy of Russian Universities]. Vy`sshee obrazovanie XXI veka [Higher Education of the XXI Century.]. 2006. № 4. P. 15-22 (in Russian).
- [4] Strategii adaptacii vy`sshix uchebny`x zavedenij: e`konomicheskij i sociologicheskij aspekty` [Adaptation strategies of higher educational institutions: economic and sociological aspects]. Pod redakciej T.L. Klyachko [Edited by T.L. Klyachko]. Moskva [Moscow]. 2002. 220 p. (in Russian).
- [5] Kexyan M.G. Neobxodimost` razrabotki strategii innovacionnogo razvitiya vuza v usloviyax innovacionnoj e`konomiki [The Need to Develop a Strategy for Innovative Development of the

- University in Innovative Economy]. *Nauka, texnika i obrazovanie* [Science, Technology and Education]. 2015. № 7 (13). P. 59-61 (in Russian).
- [6] Belyaeva G.D., Makarecz A.B., Fedorenko G.A. Strategicheskie priority razvitiya vuza v sostave innovacionnogo klastera [The Strategic Priorities of the University as Part of Innovation Cluster]. *Upravlenie èkonomicheskimi sistemami* [Management of Economic Systems]. 2013. № 3 (in Russian).
- [7] Voroshilova L.L. Innovacii i konkurentosposobnost` vuza na ry`nke obrazovatel`ny`x uslug [Innovation and Competitiveness of the University in the Market of Educational Services]. *Rossijskoe predprinimatel`stvo* [Russian Business]. 2002. № 11 (35). P. 76-81 (in Russian).
- [8] Beregova G.M., Milova Yu.Yu. Strategiya razvitiya innovacionnoj obrazovatel`noj deyatel`nosti vy`sshix uchebny`x zavedenij [The Development Strategy of Educational Activities of Higher Educational Institutions]. *Vestnik IrGTU* [Vestnik IrSTU]. 2014. № 11 (94). P. 265-270 (in Russian).
- [9] Shherbakov V.P. Vy`sshee obrazovanie v innovacionnom razvitii Irkutskoj oblasti [Higher Education in Innovative Development of Irkutsk Region]. *Innovacionny`j pedagogicheskij, metodicheskij, informacionny`j, didakticheskij zhurnal* [Innovative Pedagogical, Methodical, Informational, Didactic Journal]. 2010. № 4 (9). P. 33-35 (in Russian).
- [10] Universitet v sovremennom obshhestve: strategiya innovacionnogo razvitiya: kollektivnaya monografiya. Lazarev G.I. [i dr.]. Vladivostok: Izdatel`stvo VGUE`S [University in Modern Society: Strategy of Innovative Development: collective monograph. Lazarev G. I. [et al.]. Vladivostok: VGUES Publishing House]. 2011. 308 p. (in Russian).
- [11] Stenograficheskij otchyot o plenarnom zasedanii s`ezda Rossijskogo soyuza rektorov (vy`stuplenie Putina V.V.) [Verbatim Report on the Plenary Session of the Russian Union Congress of Rectors (speech by Putin V. V.)]. URL: www.profcom.istu.ru/prof/files/30.04.2018_putin_na_sezde_rektorov.doc – 24.05.2019 (in Russian).
- [12] Lobkovskaya N.I., Zheleznyakova A.V., Evdoshkina Yu.A. Osobennosti proektirovaniya vospitatel`nogo processa v usloviyax social`no-obrazovatel`nogo prostranstva texnicheskogo institute [Design features of educational process in conditions of a socio-educational space of a technical Institute]. *Sovremennoe obrazovanie* [Modern education]. 2017. № 2. DOI: 10.25136/2409-8736.2017.2.23278 URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=23278 (in Russian).
- [13] Rudenko V.A., Golovko M.V., Evdoshkina Yu.A., Vasilenko N.P. K voprosu ob èffektivny`x praktikax podgotovki kadrov dlya realizacii èkspoorientirovannoj strategii GK «Rosatom» [Issue of Effective Training Practices for the Implementation of the Export-Oriented Strategy of Rosatom Group]. *Global'naya yadernaya bezopasnost`* [Global nuclear safety]. 2019. № 1 (30). P. 124-135 (in Russian).
- [14] Magomedbekov G.U., Amirova M.M., Pajzullaeva Z.K. Razrabotka i primeneniye innovacionnoj prognoznoj modeli èkonomicheskogo razvitiya regiona [Development and Application of Innovative Forecast Model of Economic Development of the Region]. *Fundamental`ny`e issledovaniya* [Fundamental Study]. 2016. № 1. URL : <https://fundamental-research.ru/pdf/2016/11-5/41298.pdf> – 24.0.2019 (in Russian).

Place of Higher Education Organizations in the State and Business Economic Security Strategy

S.P. Agapova¹, N.A. Efimenko², N.I. Lobkovskaya³, J.S. Rogacheva⁴, I.A. Ukhalina⁵

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

¹ ORCID iD: 0000-0002-8484-2912

WoS Researcher ID: E-4842-2017

e-mail: svetlana-1164@mail.ru

² ORCID iD: 0000-0001-8113-6759

WoS Researcher ID: E-3439-2017

e-mail: NAEfimenko@mephi.ru

³ ORCID iD: 0000-0002-0297-5800

WoS Researcher ID: O-3879-2018

e-mail: NILobkovskaya@mephi.ru

⁴*ORCID iD: 0000-0002-3363-2691*

e-mail: ZSRogacheva@mephi.ru

⁵*ORCID iD: 0000-0002-1928-7510*

WoS Researcher ID: E-3153-2017

e-mail: uhalina@yandex.ru

Abstract – The relevance of the work is due to the responsibility of higher education institutions in the formation of highly professional human resources of the country. The article defines the role and importance of modern university education in the strategy of providing the economic security of the state and business. The objectives of the university are outlined in the framework of two main areas of development – practice-oriented preparation and technological breakthrough. Interdisciplinarity is noted as a factor in the economic efficiency of technology startups. A case study of the development strategy of VETI NRNU MEPHI is given.

Keywords: economic security, competencies, soft-skills, interaction, enterprises, economic efficiency, educational organization.

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

УДК 378.4:[316.46:351.862.82]:621.039

**ЛИДЕРСТВО В КУЛЬТУРЕ БЕЗОПАСНОСТИ И ВОПРОСЫ ЕГО
ФОРМИРОВАНИЯ В ВУЗЕ, ОРИЕНТИРОВАННОМ НА
ПОДГОТОВКУ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

© 2019 И.С. Василенко, Ю.А. Евдошкина, В.А. Руденко

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

Вопросы лидерства в культуре безопасности, в настоящее время наиболее обсуждаемые в атомной отрасли и, естественно, данный вопрос актуален для вуза, ориентированного на подготовку специалистов для данной отрасли. Этим вопросам и посвящена данная статья. В работе представлены исследования и опыт формирования лидерских качеств студентов при изучении курса «Культура безопасности».

Ключевые слова: культура безопасности, лидерство в культуре безопасности, подготовка специалистов для атомной отрасли, ценности, атомная отрасль, подготовка кадров, модель руководителя-лидера.

Поступила в редакцию 02.09.2019

После доработки 05.09.2019

Принята к публикации 13.09.2019

Ориентируясь на документы МАГАТЭ, мы рассматриваем лидерство как использование личных способностей и компетенций для управления отдельными лицами и группами людей и оказания влияния на их приверженность достижению основополагающей цели безопасности и применению принципов безопасности на основе общих целей, ценностей и норм поведения.

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].

Но автор отмечает, что в вопросе о том, как это лидерство должно осуществляться, нет единого мнения. Что позволяет лидеру эффективно контролировать и повышать уровень безопасности? Какими качествами должен обладать такой лидер? Выполнение, каких задач должно входить в обязанности лидера, чтобы он смог добиться желаемых результатов?

Именно эти вопросы и являются актуальными для Концерна Росэнергоатом в настоящее время. Как отмечает А. Петров, его генеральный директор «по результатам Корпоративной миссии OSART максимальное количество и положительных, и отрицательных отметок сосредоточены в области лидерства. Одна из причин такой ситуации – отсутствие целостного, адаптированного к Концерну инструмента,

позволяющего руководителям любого уровня в повседневной деятельности применять рекомендации и принципы по лидерству в целях безопасности». Поэтому в Концерне, на основе отечественного и зарубежного опыта, Устава, Кодекса этики и политик, разработана «Модель руководителя-лидера», которая «должна задать индикаторы для оценки результативности работы лидеров по формированию и развитию культуры безопасности» По его мнению «лидерство в развитии культуры безопасности – это не «опция», а внутренне присущее качество эффективного руководителя», а модель определяет идеальный уровень, к которому надо стремиться и является «инструментом личного развития, показывая, какого пути должен держаться каждый, чтобы развиваться и как сотрудник организации, и как член команды, и как личность» [2].

Так как Волгодонский инженерно-технический институт НИЯУ МИФИ ведет подготовку кадров для атомной отрасли, совершенствование содержания и структуры подготовки студентов осуществляется в соответствии с актуальными потребностями отрасли, обеспечении качественной опережающей подготовки специалистов для АЭС. Реализации этих целей способствует введение в учебные планы всех направлений подготовки и специальностей учебной дисциплины «Культура безопасности», ориентированной на приобретение тех знаний, умений и навыков, которые будут способствовать формированию у них основ культуры безопасности, системы ценностных ориентаций и идеалов, профессиональных навыков, ориентированных на соблюдение культуры безопасности.

Семилетний опыт преподавания в вузе данной дисциплины, позволил и авторам данной статьи выстроить «Педагогическую модель формирования культуры безопасности выпускников, ориентированных на работу в атомной отрасли», включающую исследования и направления формирования лидерских качеств у студентов [3]. Этому вопросу уделяется большое значение, так как одной из наиболее важных характеристик в отборе персонала на должность в атомной отрасли, является оценка системы отношений, (аттитюдов), диагностика личностных особенностей, которые могут положительно либо негативно влиять на эффективность и надежность деятельности (ценности, мотивация, особенности поведения, свойства характера...) [4].

Учитывая, что личность и ценности, которыми обладает лидер, лежат в основе его сущности как лидера и предопределяют его эффективность в роли лидера в сфере безопасности [1] отдельное направление наших исследований было посвящено именно этому аспекту. Изучение системы ценностных ориентаций студентов, ориентированных на работу в атомной отрасли, осуществлялось по методике «Ценностные ориентации» М. Рокича, основанная на прямом ранжировании списка ценностей: ценности-цели и ценности-средства [5]. Наиболее значимыми инструментальными ценностями для студентов оказались: образованность (широта знаний, высокая общая культура); воспитанность (хорошие манеры), ответственность (чувство долга, умение держать своё слово), честность (правдивость, искренность). Незначительными инструментальными ценностями для опрошенных студентов оказались: высокие запросы (высокие требования к жизни и высокие притязания), чуткость, непримиримость к недостаткам в себе и других, эффективность в делах (трудолюбие, продуктивность в работе).

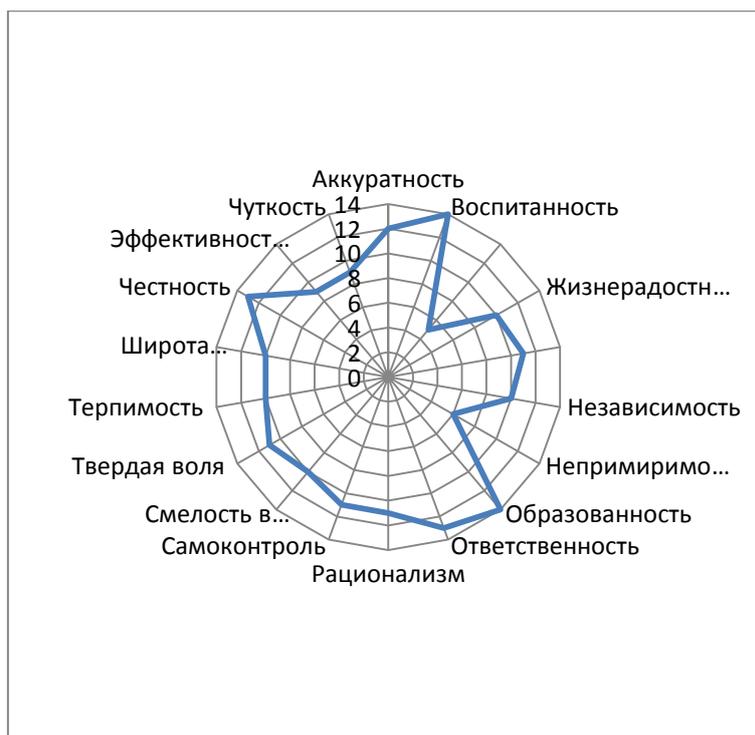


Рисунок 1 – Ранжирование по значимости инструментальных ценностей студентами

Исследование по наиболее важным принципам и ценностям, которые присущи приверженцу культуры безопасности, показало, что, в представлении студентов (см. рис.2), работник атомной станции должен быть наделен следующими качествами: «ответственность» (35,9%); «бдительность» (24,3%); «профессионализм» (24,5%); «следование установленным правилам и процедурам» (22,5%); «умение работать в команде» (6,6%); «уверенность в себе» (6%) [4].

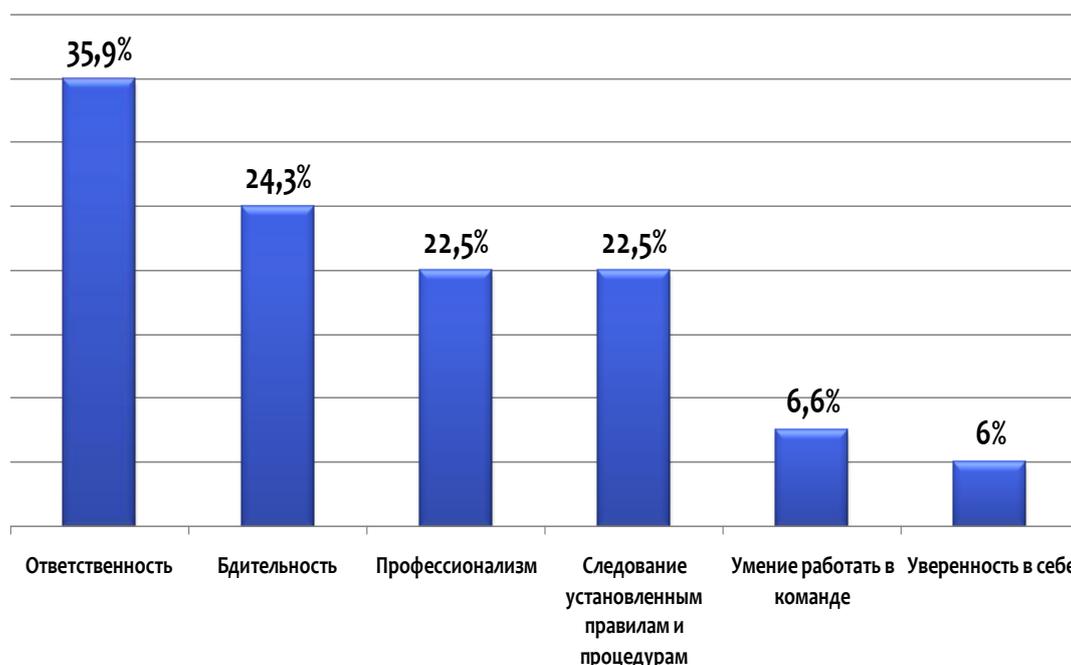


Рисунок 2 – Наиболее важные принципы и моральные ценности, которые соответствуют приверженцу культуры безопасности в атомной отрасли

Учитывая, что в процессе обучения, необходимо «формировать правильное понимание целей и приоритетов в области безопасности, поощряя нужные нормы поведения и создавая условия для формирования ценностей и представлений, уже с 2013 г. нами были выделены направления формирования культуры безопасности: изменение аттитюдов, мнений и ценностей студентов и изменение организационной структуры и баланса целей, методов организации образовательного процесса в вузе, методов формирования приверженности культуре безопасности [6].

В мотивации лидерства в области безопасности, Томас Р. Краузе рассматривает личностные черты, именуемые «Большая пятерка», которые включают в себя следующие характеристики:

- экстраверсия – теплое отношение к окружающим, коммуникабельность, уверенность в себе, активность, чувство радости, оптимизм и позитивные эмоции;
- желательность – доверие и уважительное отношение к окружающим людям, откровенность, подчинение правилам, скромность и сочувствие;
- сознательность – компетентность, аккуратность, чувство ответственности, стремление к достижению результатов, самодисциплина и обдуманность в действиях;
- эмоциональная стабильность – уверенность в себе и окружающих, оптимистический подход к трудностям и способность справляться со стрессом;
- интеллектуальная открытость – любознательность, исследовательский подход к трудностям, развитое воображение [1].

Исследования в данном направлении в вузе ведутся с 2013 года. Ежегодно проводится диагностика качеств личности студентов 1 курса и для сравнения их показателей на 3 курсе. Данная диагностика проводится по договору с НИИ мониторинга образования по сертифицированным методикам, в соответствии с чем, вуз по каждой группе студентов всех направлений получает диаграмму степени выраженности качеств личности студентов группы (рис. 3), а студентам в личные кабинеты приходит развернутая характеристика по данным параметрам.

Так для групп разных лет набора, выявлены следующие групповые характеристики:

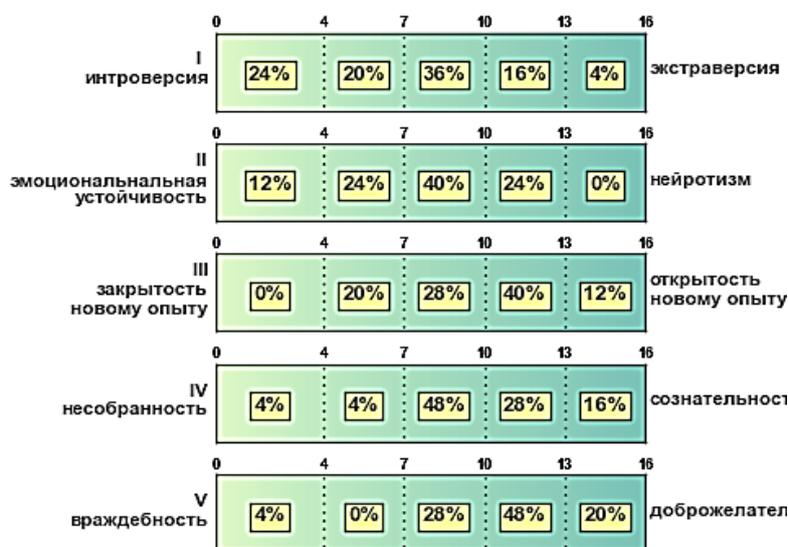


Рисунок 3 – Диаграммы степени выраженности качеств личности в группах студентов набора 2018 г.

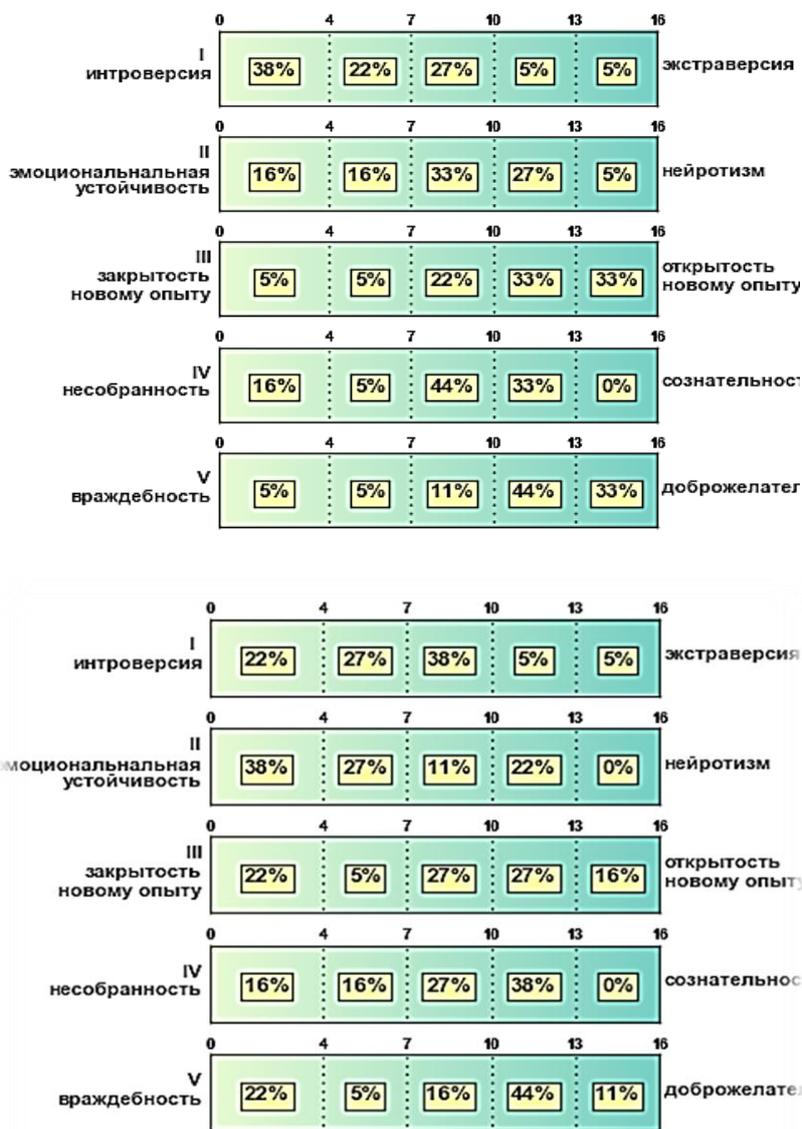
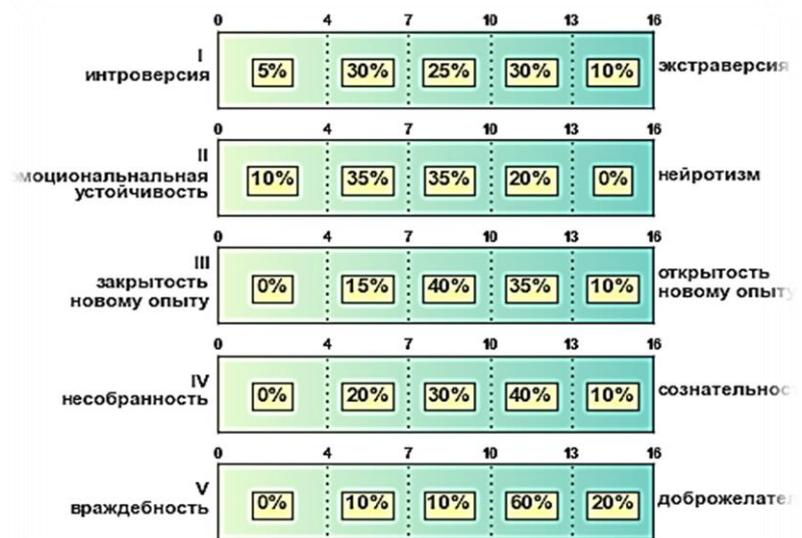


Рисунок 4 – Диаграммы степени выраженности качеств личности в группах студентов набора 2017 г.



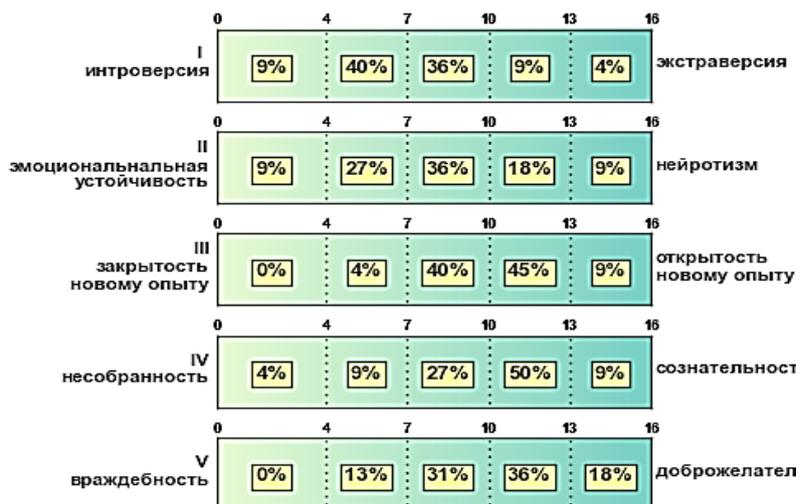


Рисунок 5 – Диаграммы степени выраженности качеств личности в группах студентов набора 2016 г.

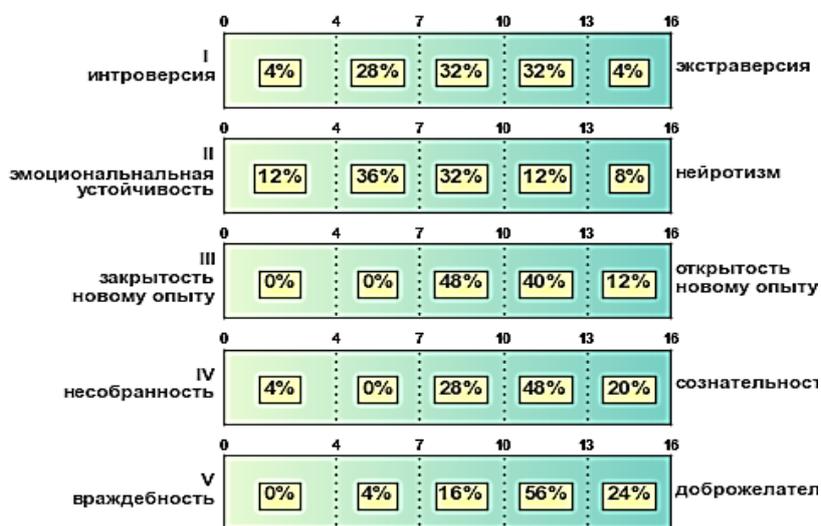


Рисунок 6 – Диаграммы степени выраженности качеств личности в группах студентов набора 2015 г.

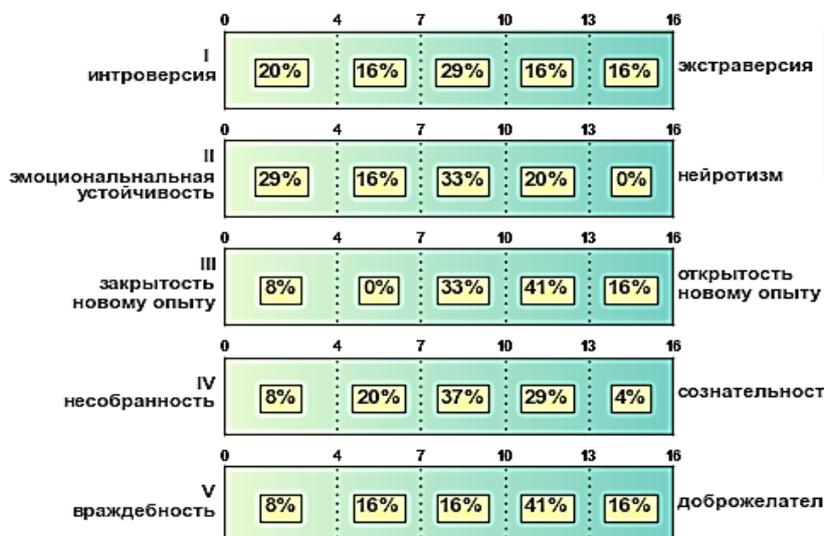


Рисунок 7 – Диаграммы степени выраженности качеств личности в группах студентов набора 2014 г.

Значимость данных характеристик в определении лидерских позиций в безопасности выделяет и James Reason в книге «Managing maintenance error: a practical guide». Автор отмечает, что характерные стили работы связаны с разными типами личности в контексте идеи о предрасположенности к несчастным случаям. По его наблюдениям, как и в наших исследованиях, значительное большинство людей, по типам личности, занимают промежуточное положение между категориями интроверсии - экстраверсии и устойчивости - неустойчивости, с относительно малым количеством крайних случаев, но их сочетание и показывает нам позицию лидерства, присущую отдельным личностям:

	нестабильный		
	Человек настроения	Ранимый	
	Тревожный	Беспокойный	
	Пессимистичный	Оптимистичный	
	Некоммуникабельный	Агрессивный	
	Тихий	Активный	
интроверты	Пассивный	Общительный	экстраверты
	Осторожный	Компанейский	
	Задумчивый	Живой	
	Управляемый	Беззаботный	
	Надежный	Лидерство	
	стабильный		

Рисунок 8 – Позиция лидерства в типах личности, основанных на категориях интроверсии - экстраверсии и устойчивости – неустойчивости [7]

Во многих случаях, нештатных ситуациях на АЭС персоналу приходится действовать в ситуации неопределенности, стресса. И от того, какое предпринято действие, какая стратегия поведения персонала проявилась в данной неопределенной ситуации, зависит предотвращение аварии. Следовательно, для вуза, в рамках рассмотрения вопросов культуры безопасности и лидерства, важным является изучение поведения студентов в стрессовых ситуациях или в ситуации неопределенности, выявление механизмов совладания, или копинг-стратегий, определяющих когнитивные, эмоциональные и поведенческие стратегии их личности, стратегии их поведения. Это и определило необходимость изучения данного вопроса, для чего был использован опросник «Копинг-стратегии» Р. Лазаруса. В результате исследования было выявлено, что у студентов изучивших курс «Культура безопасности» стратегии «конфронтация», «дистанцирование», «бегство-избегание» проявляются в меньшем процентном соотношении, чем у тех студентов, которые еще не изучали данный курс, а стратегии «самоконтроль», «принятие ответственности» и «планирование решения проблемы» – наоборот [8].

Кроме того, необходимо учитывать, что набор личностных ценностей лидера должен соответствовать ценностям, необходимым для работы, т. е. ценностям Госкорпорации, так как именно они определяют выбор лидерского стиля, а также оптимальных решений для создания культуры организационной безопасности.

Поэтому ряд наших исследований и направлений действий в студенческой среде ориентирован на это направление, к ним относятся исследования по проблемам:

- Культура безопасности в системе ценностей Госкорпорации «Росатом» [9];
- Мотивация профессионального самосовершенствования работников атомной отрасли средствами внедрения ценностей Госкорпорации «Росатом» [10];
- Корпоративные ценности как основа формирования профессионального самоопределения студентов при подготовке специалистов для атомной отрасли [11]

Учитывая то, что в студенческом возрасте личность еще формируется необходимо студентам обучать быть гибкими глубокому пониманию собственной ценностной ориентации и структуры личности, так как эффективный лидер знает себя и свои ценности, следовательно, и то, как можно наиболее эффективно использовать свои ресурсы и выполнять свои обязательства, демонстрируя приверженность культуре безопасности. Поэтому все большее количество специалистов-исследователей и работодателей, обращают внимание на педагогическую сторону вопроса обучения лидерству, и отмечают значимость развития у студентов, как будущих руководителей, не только навыков теории и практики управления, но и одновременно формирования лидерских качеств для успешной профессиональной деятельности в будущем. Особенно, при подготовке специалистов для атомной отрасли, возрастает значение развития личностных качеств, таких как целеустремленность, ответственность, порядочность, упорство, коммуникабельность, лидерские тенденции, способность увлекать за собой людей для достижения поставленной цели следуя принципам культуры безопасности.

В проведенном нами исследовании по вопросам лидерства у 43 студентов 4-х, 5-х курсов специальности «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг» был использован тест «Диагностика лидерских способностей» по оценке способности человека быть лидером [12].

По результатам исследования было выявлено, что у большинства студентов (77%) выявлен средний уровень способностей к лидерству, низкий – у 4% и высокий у 19% студентов.

Для формирования качеств лидера у студентов, практикой аудиторных практических занятий предусмотрены тренинги как комплекс ролевых упражнений, включающий различные, зачастую противоположные интересы его участников и необходимостью принятия каких-либо решений по окончании или в ходе тренинга. Тренинги по «Культуре безопасности» помогают формировать такие ключевые квалификации, как коммуникативные способности, толерантность, умение работать в команде, самостоятельность мышления и т.д. Используемые тренинговые упражнения характеризуются направленностью на снятие определенных практических проблем, приобретение навыков выполнения конкретных приемов деятельности, командного взаимодействия [13].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что процесс подготовки специалистов, ориентированных на работу в атомной отрасли по проблеме лидерства в культуре безопасности должен быть ориентирован на формирование модели и личностного стиля поведения будущих специалистов, которая способствует 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 индикаторами для оценки результативности работы лидеров по формированию и развитию культуры безопасности.

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. Петров, А. Колонка главного редактора / А. Петров // РЭА. – 2019. – № 8. – С. 3.
3. Василенко, Н.П. Педагогическая модель формирования культуры безопасности выпускников, ориентированных на работу в атомной отрасли / Н. П. Василенко, Ю. А. Евдошкина // Безопасность ядерной энергетики: тезисы докладов XIII Международной научно-практической конференции, 31 мая – 2 июня 2017 г. / ВИТИ НИЯУ МИФИ [и др.]. – Волгоград : [Б. и.], 2017. ISBN 978-5-7262-2364-3

4. Евдошкина, Ю. А. Практико-ориентированная технология формирования культуры безопасности выпускников, ориентированных на работу в атомной отрасли / Ю. А. Евдошкина, В. А. Руденко // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 4 (25). – С. 122-129.
5. Руденко, В. А. Ценностная составляющая культуры безопасности / В. А. Руденко, Н. П. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – № 4(9). – С. 82-86.
6. Руденко, В.А. Практические методы формирования приверженности культуре безопасности на индивидуальном уровне у студентов вуза // Культура ядерной безопасности. – 2013. – № 1. – С.100-103.
7. Reason, J. and Hobbs, A. *Managing maintenance error: a practical guide*. – Ashgate, 2003. – 183 p.
8. Василенко, И. С. Копинг-стратегии в формировании должного поведения студентов, ориентированных на работу в атомной отрасли в рамках курса «Культура безопасности» / И. С. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 4 (25). – С. 130-136.
9. Руденко, В. А. Культура безопасности в системе ценностей Госкорпорации «Росатом» / В. А. Руденко, Н. П. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 1 (18). – С. 118-122.
10. Руденко, В. А. Мотивация профессионального самосовершенствования работников атомной отрасли средствами внедрения ценностей Госкорпорации «Росатом» / В. А. Руденко, Н. П. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 2 (19). – С. 77-82.
11. Томилин, С. А. Корпоративные ценности как основа формирования профессионального самоопределения студентов при подготовке специалистов для атомной отрасли / С. А. Томилин, Н. П. Василенко, А. В. Железнякова, И. С. Василенко // Педагогика и просвещение. – 2017. – № 1. – С. 31-41. URL : http://nbpublish.com/library_read_article.php?id=22076DOI:10.7256/2454-0676.2017.1.22076.
12. Фетискин, Н. П. Социально-психологическая диагностика развития личности и малых групп / Н. П. Фетискин, В. В. Козлов, Г. М. Мануйлов. – Москва : Издательство Института Психотерапии, 2002. С. 222-225.
13. Руденко, В. А. Реализация интерактивных технологий обучения в процессе преподавания дисциплин, направленных на обеспечение безопасного функционирования АЭС / В. А. Руденко, Ю. А. Евдошкина // Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2015 : сборник тезисов и статей научно-практической конференции, 16-20 февр. 2015 г. – Волгоград : ВИТИ НИЯУ МИФИ. – С. 161-164.

REFERENCES

- [1] Krause Thomas R. Motivaciya liderstva v oblasti bezopasnosti na vsex urovnyah organizacii: tri vaznyh`x aspekta [Motivating security leadership at all levels of the organization: three important aspects]. 2005. <https://hr-portal.ru/article/motivaciya-liderstva-v-oblasti-bezopasnosti-na-vseh-urovnyah-organizacii-tri-vaznyh-aspekta> (in Russian).
- [2] Petrov A. Kolonka glavnogo redaktora [Editor-in-chief Column]. RE`A. 2019. № 8. С. 3 (in Russian).
- [3] Vasilenko N.P., Evdoshkina Yu.A. Pedagogicheskaya model` formirovaniya kul`tury` bezopasnosti vy`pusknikov, orientirovanny`x na rabotu v atomnoj otrasli [Pedagogical model for developing a safety culture graduates oriented to work in the nuclear industry]. Bezopasnost` yadernoj e`nergetiki: tezisyy` dokladov XIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, 31 maya – 2 iyunya 2017 g. VITI NIYaU MIFI [Nuclear energy Safety: abstracts of the XIII International scientific-practical conference, may 31 – June 2, 2017 VITI NRNU MEPHI]. Volgondsk. ISBN 978-5-7262-2364-3 (in Russian).
- [4] Evdoshkina Yu.A., Rudenko V.A. Praktiko-orientirovannaya texnologiya formirovaniya kul`tury` bezopasnosti vy`pusknikov, orientirovanny`x na rabotu v atomnoj otrasli. [Practice-oriented technology of creating a culture of safety graduates oriented to work in the nuclear industry]. Global`naya yadernaya bezopasnost` [Global nuclear safety]. 2017. № 4 (25). С. 122-129 (in Russian).
- [5] Rudenko V.A., Vasilenko N.P. Cennostnaya sostavlyayushhaya kul`tury` bezopasnosti [Value component of safety culture]. Global`naya yadernaya bezopasnost` [Global nuclear safety]. 2013. № 4 (9). С. 82-86 (in Russian).
- [6] Rudenko V.A., Vasilenko N.P. Prakticheskie metody` formirovaniya priverzhennosti kul`ture bezopasnosti na individual`nom urovne u studentov vuza [Practical methods of formation of commitment to safety culture at the individual level of University students]. Kul`tura yadernoj bezopasnosti [Nuclear safety Culture]. 2013. № 1. С.100-103 (in Russian).

- [7] Reason, J. and Hobbs, A. *Managing maintenance error: a practical guide*. Ashgate, 2003. 183 p.
- [8] Vasilenk, I.S. Koping-strategii v formirovanii dolzhnogo povedeniya studentov, orientirovanny`x na rabotu v atomnoj otrasli v ramkax kursa «Kul`tura bezopasnosti» [Coping-strategies in the formation of proper behavior of students focused on work in the nuclear industry in the course «Safety Culture»]. *Global'naya yadernaya bezopasnost`* [Global nuclear safety]. 2017. № 4 (25). С. 130-136 (in Russian).
- [9] Rudenko V.A., Vasilenko N.P. Kul`tura bezopasnosti v sisteme cennostej Goskorporacii «Rosatom» [Safety culture in the value system of Rosatom state Corporation]. *Global'naya yadernaya bezopasnost`* [Global nuclear safety]. 2016. № 1 (18). С. 118-122 (in Russian).
- [10] Rudenko V.A., Vasilenko N.P. Motivaciya professional'nogo samosovershenstvovaniya rabotnikov atomnoj otrasli sredstvami vnedreniya cennostej Goskorporacii «Rosatom» [Motivation of professional self-improvement of employees of nuclear industry by means of introduction of values of Rosatom state Corporation]. *Global'naya yadernaya bezopasnost`* [Global nuclear safety]. 2016. № 2 (19). С. 77-82 (in Russian).
- [11] Tomilin S.A., Vasilenko N.P., Zheleznyakova A.V., Vasilenko I.S. Korporativny`e cennosti kak osnova formirovaniya professional'nogo samoopredeleniya studentov pri podgotovke specialistov dlya atomnoj otrasli [Corporate values as a basis for the formation of professional self-determination of students in the training of specialists for the nuclear industry]. *Pedagogika i prosveshhenie* [Pedagogy and education]. 2017. № 1. С. 31-41. URL: http://nbpublish.com/library_read_article.php?id=22076. DOI: 10.7256/2454-0676.2017.1.22076 (in Russian).
- [12] Fetiskin N.P., Kozlov V.V., Manuilov G.M. Social'no-psixologicheskaya diagnostika razvitiya lichnosti i mal'x grupp [Socio-psychological diagnosis of personality development and small groups]. Moskva: Izdatel'stvo Instituta Psixoterapii [Moscow: Publishing House Of The Institute Of Psychotherapy]. 2002. С. 316-320 (in Russian).
- [13] Rudenko V.A., Evdoshkina Yu.A. Realizaciya interaktivny`x texnologij obucheniya v processe prepodavaniya disciplin, napravlenny`x na obespechenie bezopasnogo funkcionirovaniya AE`S [Implementation of interactive learning technologies in the process of teaching disciplines aimed at ensuring the safe operation of nuclear power plants]. Nauchnaya sessiya NIYaU MIFI – 2015 : sbornik tezisev i statej nauchno-prakticheskoy konferencii, 16-20 fevr. 2015 g. – Volgodonsk: VITI NIYaU MIFI [Scientific session of MEFHI – 2015: collection of abstracts and articles of the scientific-practical conference, February 16-20. 2015 – Volgodonsk: VITI NRNU MEFHI]. С. 161-164 (in Russian).

LEADERSHIP IN SAFETY CULTURE AND ISSUES OF ITS FORMATION IN THE UNIVERSITY FOCUSED ON TRAINING SPECIALISTS FOR THE NUCLEAR INDUSTRY

I.S. Vasilenko¹, Y.A. Evdoshkina², V.A. Rudenko³

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

¹ORCID iD: 0000-0002-2588-8283

e-mail: isv.trener@gmail.com

²ORCID iD: 0000-0002-6704-0643

WoS Researcher ID: G-8379-2017

e-mail: YAEvdoshkina@mephi.ru

³ORCID iD: 0000-0002-6698-5469

WoS Researcher ID: B-7730-2016

e-mail: VARudenko@mephi.ru

Abstract – Issues of leadership in the safety culture are currently the most discussed in the nuclear industry and, of course, this issue is relevant for the University, focused on training specialists for this industry. This article is devoted to these issues. The paper presents research and experience in the formation of leadership qualities of students in the study of the course «safety Culture».

Keywords: safety culture, leadership in safety culture, training of specialists for nuclear industry, values, nuclear industry, personnel training, model of leader.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ НОМЕРА

Абу Сондос М.А.	56
Агапова С.П.	119
Аникеев А.В.	80
Ансах М.А.С.	74
Анцибор А.В.	111
Арутюнян А.К.	89
Афшар И.	80
Баран С.А.	50
Белова С.К.	80
Берела А.И.	66
Бубликова И.А.	24
Василенко И.С.	127
Выговский С.Б.	89
Головко М.В.	111
Губеладзе А.Р.	33
Губеладзе О.А.	33
Демиденко А.С.	41
Демин В.М.	56
Евдошкина Ю.А.	127
Елохин А.П.	7
Ефименко Н.А.	119
Кавришвили З.О.	101
Лобковская Н.И.	119
Пимшин И.Ю.	41
Пимшин Ю.И.	41
Подрезов Н.Н.	74
Проскуряков К.Н.	80
Рачков В.Л.	101
Рогачева Ж.С.	119
Руденко В.А.	127
Савандер В.И.	56
Сметанкин Г.П.	50
Судиловская И.В.	111
Томилин С.А.	66
Ухалина И.А.	119
Федорченко С.Н.	7
Федотов А.Г.	66
Хачатрян А.Г.	89
Цуверкалова О.Ф.	24

AUTHOR INDEX OF VOL. 3, 2019

Abu Sondos M.A.	56
Afshar E.	80
Agapova S.P.	119
Anikeev A.V.	80
Ansah M.N.S.	74
Antsibor A.V.	111
Baran S.A.	50
Belova S.K.	80
Berela A.I.	66
Bublikova I.A.	24
Demidenko A.S.	41
Demin V.M.	56
Efimenko N.A.	119
Elokhin A.P.	7
Evdoshkina Y.A	127
Fedorchenko S.N.	7
Fedotov A.G.	66
Golovko M.V.	111
Gubeladze A.R.	33
Gubeladze O.A.	33
Harutyunyan A.	89
Kavrishvili Z.O.	101
Khachatryan A.	89
Lobkovskaya N.I.	120
Pimshin I.Yu	41
Pimshin Yu.I.	41
Podrezov N.N.	74
Proskuryakov K.N.	80
Rachkov V.L.	101
Rogacheva J.S.	119
Rudenko V.A.	127
Savander V.I.	56
Smetankin G.P.	50
Sudilovskaya I.V.	111
Tomilin S.A	66
Tsuverkalova O.F.	24
Ukhalina I.A.	119
Vasilenko I.S.	127
Vygovskiy S.B.	89

NOTES FOR AUTHORS

(Dear authors, the editors of the journal draw your attention to some changes in the rules of the article preparation)

The full text of article intended for publication should be signed by authors, it has to be followed by application from the institution where the work is made, resolution on publication possibility. One file consists of one paper which has the following:

- UDC index;
- the title, the structured abstract (200-250 words) and keywords in Russian and English (not less than 10 speech units);
- the list of references in Russian and English;
- information about the authors in Russian and English (a surname, a name, a middle name, a work place, a position, an academic degree, a rank, postal address, and E-mail address, contact phone; specify who to be corresponded with);
- a file with information about place of employment in Russian and English, including the postal address and index (specify the place of employment of each author);
- ORCID и Researcher ID index of each author (<http://orcid.org> и <http://www.researcherid.com>).

The article should be structured: introduction (review of problems, objective of work); theory of the issue; a detailed presentation of the methods of conducting experiments, a description of materials and methods of analysis, statistical processing is desirable; the discussion of the results; conclusion. It is enough to describe the objective of the work and the results obtained for articles of a production nature.

The article should contain only the most necessary formulas, it is desirable to abandon the intermediate calculations. The equation editor of Equation 3.0 is recommended to record the formulas. All formulas are aligned to the center of the page, numbered in parentheses on the right and referred to in the text of the article. Inclusion of tables in the article should be appropriate. Tables should be numbered and headings in Russian and English (10 pf). It is desirable that the tables do not exceed one page of text. Figures should be clear when printing in black and white, numbered, figure captions in Russian and English (10 pf), have links in the text and be accompanied by justifications and conclusions. The units of measurement should be given in accordance with the International System (SI).

An article should be processed in the Microsoft Office 97-2003 Word 7.0 format, 12 point font Times New Roman; print – 1 interval. Please do not use signs of forced transfer and additional gaps. Page parameters: all sides are 2,5 cm. The volume of article has to be no more than 15 pages of the typewritten text, including tables, drawings (no more than 10) and the list of references (12-20 sources). If the text of the article is less than 2500 type characters, it may not be considered. It is necessary to check the articles through the Antiplagiat program, allowable borrowing and self-citation – no more than 20%.

In order to improve the quality and objectivity of publications, the authors are intended to reflect the advanced scientific experience of foreign countries, Russia and the CIS on the subject matter in the articles. The bibliography should be in accordance with State Standard Specification (GOST) 7.1-2003 “Bibliographic Record and Bibliographic Description. General Requirements and Drafting rules” (and its later version of 2008). References should include at least 12 sources (no more than 3 references to your own articles). There should be obligatory at least 5 sources later than 2016, and at least 4 references to foreign studies of recent years (from foreign countries, outside the former USSR). References are given at the end of article in order they mentioned. References are highlighted with square brackets. References to foreign sources are given in the original language and are accompanied, in case of translation into Russian, with indication of the translation. Textbooks, reference books, guidelines and recommendations are not included in the list of references. References are provided separately (see the guidelines in «The List of References Standard in English»). The bibliography in English should be issued according to **Scopus** standard specification. Indicate article **DOI** if it in the presence.

To accept an article in the journal you should provide the following materials:

- an article file in Word format;
- the same file in pdf format signed by the author;
- separate files of all pictures in the bmp, jpeg or gif formats;
- application from the institution where the work is made;
- expert resolution on publication possibility.

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 ekspluatsii bloka AES [The analysis and representation of the action environment in system of technology design of equipment dismantle during NPP unit taking out of operation] [Global nuclear safety]. 2014. № 1(10). P. 25-31 (in Russian).
- [2] Lobkovskaya N.I., Evdoshkina Yu.A. Professional`noe celepolaganie kak sostavlyayushhaya kul`tury` bezopasnosti budushhego specialista-atomshhika [Professional Goal-Setting as a Component of the Safety Culture of a Future Nuclear Specialist]. Sovremennoe obrazovanie [Modern Education]. 2017. № 1. P. 32-38. URL: http://e-notabene.ru/pp/article_22498.html (in Russian).

For books:

- [3] Mogilev V.A., Novikov S.A. Faykov Yu.I. Tekhnika vzryvnogo eksperimenta dlya issledovaniya mekhanicheskoy stoykosti konstruktsiy. [Explosive experiment techniques for research of mechanical firmness of designs]. Sarov. FGUP «RFYaTs-VNIIEF» [Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics]. 2007. 215 p. (in Russian).

For web-resources:

- [4] Strategia razvitiya transportnogo kompleksa Rostovskoj oblasti do 2030 goda [Development strategy of a transport complex of the Rostov region till 2030]. Officialnij sait Ministerstva transporta Rostovskoj 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 izlucheniyem [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 7.1-2003 «Библиографическая запись и библиографическое описание. Общие требования и правила составления» (и его более поздней версии 2008 года). 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 «Центратомархив». 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 : Магма, 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://voennoepravo.ru/node/2149> (дата обращения: 01.08.2018).

Адрес редакции журнала (для отправки печатной корреспонденции):
347360, Россия, Ростовская область, г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94
Редакция журнала «Глобальная ядерная безопасность»
E-mail: oni-viti@mephi.ru
Тел.: +79281883628

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

2019, 3(32)

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

Сдано в набор 16.09.2019 г.

Компьютерная верстка Казак Ю.Ю.

Подписано к печати 20.09.2019 г.

Бумага «SvetoCory» 80 г/м². Объем 8,74. печ.л.

Гарнитура «TimesNewRoman»,

Тираж 300 экз.

Отпечатано в типографии ВИТИ (ф) НИЯУ МИФИ