

NATIONAL RESEARCH NUCLEAR UNIVERSITY MEPhI

GLOBAL NUCLEAR SAFETY

2019, 2(31)

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*)

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

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

Founder:

National Research Nuclear University MEPhI

Editorial address:

Kashirskoe shosse 31, Moscow, 115409, Russia
Lenin Street, 73/94, Rostov region, Volgodonsk, 347360, Russia
telephone: (8639)222717, e-mail: oni-viti@mephi.ru

Press address:

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

Moscow

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

2019, 2(31)

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 от 30.05.2019)

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 Анджей, 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)

С.М. Бурдаков, к-т техн. наук, доц. (Россия)

И.А. Бубликова, к-т техн. наук, доц. (Россия)

Учредитель:

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

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

Адрес типографии: 347360, Россия, Ростовская обл., г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94.

Москва

CONTENTS

2019, 2(31)

THE PROBLEMS OF NUCLEAR, RADIATION AND ECOLOGICAL SAFETY

Validation of the transport packing set compatibility to safety requirements <i>Yu.Yu.Lushina, O.Yu.Zhabunina, N.Yu.Parshukova</i>	7
Analysis of Existing Protection Systems from Buffer Overflow and Methods of their Bypass <i>M.A. Parinov</i>	15

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

Influence of Various Parameters on the Hollow Element Stability <i>S.A. Rashchepkina</i>	23
Weld Pool Static Equilibrium in Butt Welds with Full Penetration <i>A.M. Rybachuk, V.F. Cubarew, Yu.V. Doronin</i>	31
Development of Methodical Recommendations to Improve Treatment Accuracy of Nuclear Engineering Products <i>V.T. Saunkin, V.V. Krivin, N.G. Grigoriev, O.E. Draka</i>	39
Study of the Impact of Hydraulic Rolling Technology on the Condition of Press Connections <i>A.M. Smirnov, V.V. Shishov</i>	47
Method of Heat-Hydraulic Tests of Long-Relined Pipes of Separator - Vapor Heaters for NPP with Water-Water Energy Reactors <i>M.Yu. Khizhov</i>	59

NUCLEAR FACILITIES EXPLOITATION

Possibilities of Logistics in Ensuring Efficiency and Radiation Safety of Production Process of Nuclear Power Stations Unit Decommissioning <i>A.I. Berela, S.A. Tomilin, A.G. Fedotov</i>	68
Interactive Album of Neutron-Physical Characteristics of WWER Reactor Fuel Column <i>A.A.Lapkis, V.A.Ignatkin, M.A.Kolomietz</i>	76
Metrological Tests of Measuring Subsystems <i>E.I. Cvetkov, Yu.P. Mucha, I.Y. Koroleva, A.D. Korolev</i>	86

Monitoring of Berth-Calibrator Geometrical Parameters of Fuel Assembly at Nuclear Power Stations <i>Y.I. Pimshin, G.A. Naumenko, Yu.A. Psarev</i>	93
--	----

Comparative Analysis of Neutrons Properties of Nuclear Fuel Produced by Westinghouse and Fuel Element for WWER-1000 Reactors by code SERPENT <i>M.A. Abu Sontos, V.M. Demin, A.D. Smirnov</i>	103
--	-----

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

Some Aspects of Final Insulation of Radiation Wastes in Russia <i>G.S. Zinoviev, V.S. Chembura</i>	110
---	-----

The Formation of the Safety Culture of School Students in the Organization System of Leading Personnel Training for Atomic Energy <i>V.A. Rudenko, N.F. Privalova</i>	123
--	-----

Author Index of vol. 2, 2019	134
------------------------------	-----

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 2(31), 2019

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Обоснование соответствия транспортного упаковочного комплекта требованиям безопасности

Ю.Ю. Лушина, О.Ю. Жабунина, Н.Ю. Паришкова 7

Анализ существующих средств защиты от переполнения буфера на стеке и способы их обхода

М.А. Паринов 15

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

Влияние различных параметров на устойчивость полого элемента

С.А. Ращепкина 23

Статическое равновесие сварочной ванны при сварке стыковых швов с полным проплавлением

А.М. Рыбачук, В.Ф. Кубарев, Ю.В. Доронин 31

Разработка методических рекомендаций повышения точности обработки изделий атомного машиностроения

В.Т. Саункин, В.В. Кривин, Н.Г. Григорьев, О.Е. Драка 39

Исследование влияния технологии гидровальцевания на состояние прессовых соединений

А.М. Смирнов, В.В. Шишов 47

Методика теплогидравлических испытаний продольно-оребрённых труб сепараторов – пароперегревателей для аэс с водо-водяными энергетическими реакторами

М. Ю. Хижов 59

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

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 68

Интерактивный альбом нейтронно-физических характеристик топливной загрузки реакторов ввэр

А.А. Лапкис, В.А. Игнаткин, М.А. Коломиец 76

Метрологические испытания измерительных подсистем <i>Э.И. Цветков, Ю.П. Муха, И.Ю. Королева, А.Д. Королев</i>	86
Контроль геометрических параметров стапеля-калибратора тепловыделяющих сборок на атомных станциях <i>Ю.И. Пимшин, Г.А. Науменко, Ю.А. Псарёв</i>	93
Сравнительный анализ нейтронных характеристик ядерного топлива производства westinghouse и твэл для реакторов типа ввэр-1000 по коду serpent <i>М.А. Абу Сондос, В.М. Демин, А.Д. Смирнов</i>	103
КУЛЬТУРА БЕЗОПАСНОСТИ И СОЦИАЛЬНО-ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ	
Некоторые аспекты финальной изоляции радиационных отходов в россии <i>Г.С. Зиновьев, В.С. Чембура</i>	110
Формирование культуры безопасности школьников в системе организации опережающей подготовки кадров для атомной энергетики <i>В.А. Руденко, Н.Ф. Привалова</i>	123
Авторский указатель номера 2(31), 2019	133

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 621.039.746

**ОБОСНОВАНИЕ СООТВЕТСТВИЯ ТРАНСПОРТНОГО
УПАКОВОЧНОГО КОМПЛЕКТА ТРЕБОВАНИЯМ
БЕЗОПАСНОСТИ**

© 2019 Ю.Ю. Лушина^{*}, О.Ю. Жабунина^{**}, Н.Ю. Паршукова^{*}

^{}Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»,*

Снежинск, Челябинская обл., Россия

*^{**}Федеральное государственное унитарное предприятие «РФЯЦ-ВНИИТФ
им. акад. Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинская обл., Россия*

Целью работы является расчетное обоснование соответствия разработанного транспортного упаковочного комплекта (ТУК) нормативным требованиям безопасности в условиях наземного транспортирования отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС). Безопасность перевозки ОТВС должна быть подтверждена сохранением герметичности ТУК при аварийных падениях с высоты 9 м на горизонтальную поверхность и с высоты 1 м на штырь круглого сечения. Указанные испытания были имитированы численными расчетами в программе конечно-элементного анализа, которые показали, что предлагаемая конструкция ТУК удовлетворяет нормативным требованиям.

Ключевые слова: безопасность, транспортировка, отработавшие тепловыделяющие сборки, радиоактивный материал, опасный груз, транспортный упаковочный комплект, герметичность, система герметизации, контейнер, пенал, программа конечно-элементного анализа, прочность.

Поступила в редакцию 29.03.2019

После доработки 16.04.2019

Принята к публикации 26.04.2019

Обеспечение безопасности при наземном транспортировании ОТВС с атомных станций на перерабатывающее предприятие является актуальной задачей.

Нормативные требования к перевозке радиоактивных материалов (РМ) по территории РФ сформулированы в документе НП-053-16 [1], согласно которому транспортировка РМ должна осуществляться в транспортных упаковочных комплектах – ТУК, обеспечивающих герметичность перевозимого опасного груза в нормальных и аварийных условиях перевозки. Способность конструкции ТУК выдержать транспортные аварии должна быть подтверждена следующими регламентированными [1] испытаниями:

- падение упаковки на плоскую горизонтальную поверхность с высоты 9 м;
- падение упаковки с высоты 1 м на штырь круглого сечения диаметром 15 см и высотой 20 см, изготовленный из мягкой стали (сталь 20 [2]).

В настоящее время на различных атомных электростанциях (АЭС) используется свой вид топлива. Так, на Белоярской АЭС используется топливо для реакторов АМБ (уран-графитовый канальный энергетический реактор – атом мирный большой), а на Билибинской АЭС – топливо реактора ЭГП-6 (водно-графитовый гетерогенный реактор канального типа). Для каждого вида отработавшего топлива требуется своя конструкция упаковки. Для АМБ был разработан ТУК-84/1, конструкция которого удовлетворяет требованиям [1]. Для топлива реактора ЭГП-6 до настоящего времени не

существовало упаковки для транспортировки. ОТВС данного реактора помещены на длительное хранение в бассейны выдержки. Для доставки ОТВС реактора ЭГП-6 на перерабатывающее предприятие планируется разработать транспортную упаковку, которая и будет рассмотрена в данной работе.

С учетом размеров ОТВС (длина ≈ 8 м) разрабатывается ТУК, который представляет собой длинномерную конструкцию с габаритными размерами – диаметром от 1160 мм (по фланцу) до 812 мм (в узкой части) и длиной 8726 мм (рис. 1).

Система герметизации (СГ) ТУК имеет две ступени: пенал и контейнер, каждый из которых состоит из крышки и корпуса, соединяющихся шпильками. Корзина с шестью ОТВС размещается в пенале, который устанавливается в контейнер. Контейнер является сварной конструкцией.

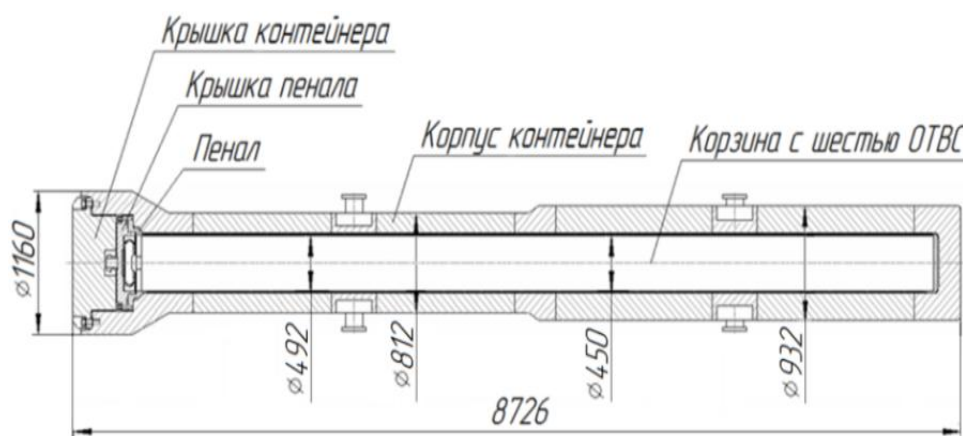


Рисунок 1 – Схема конструкции ТУК [TPS constructional scheme]

Физико-механические характеристики материалов элементов ТУК [3-4] приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические характеристики материалов [Physical and mechanical characteristics of materials]

Элемент ТУК	Корпус контейнера	Крышка контейнера, пенал	Шпильки
Материал	Сталь 09Г2СА-А	Сталь 12Х18Н10Т	Сталь 38ХНЗМФА
Плотность ρ , г/мм ³	0,0078		
Модуль упругости E , МПа	$2 \cdot 10^5$		
Коэффициент Пуассона μ	0,3		
Предел текучести σ_T , МПа	245	196	882
Предел прочности σ_B , МПа	430	510	980
Относительное удлинение δ , %	19	35	11

Для обоснования безопасной транспортировки ОТВС в разработанном ТУК при нормальных и аварийных условиях перевозки в программе конечно-элементного анализа [5] были выполнены задачи:

- модальный анализ конструкции ТУК;
- оценки напряжённо-деформированного состояния (НДС) ТУК в условиях аварийного падения упаковки на горизонтальную поверхность с высоты 9 м крышкой, боковой поверхностью и углом крышки;
- оценки НДС ТУК в условиях аварийного падения упаковки на штырь круглого сечения крышкой, боковой поверхностью и углом крышки.

Конечно-элементная модель (КЭМ) ТУК приведена на рисунке 2.

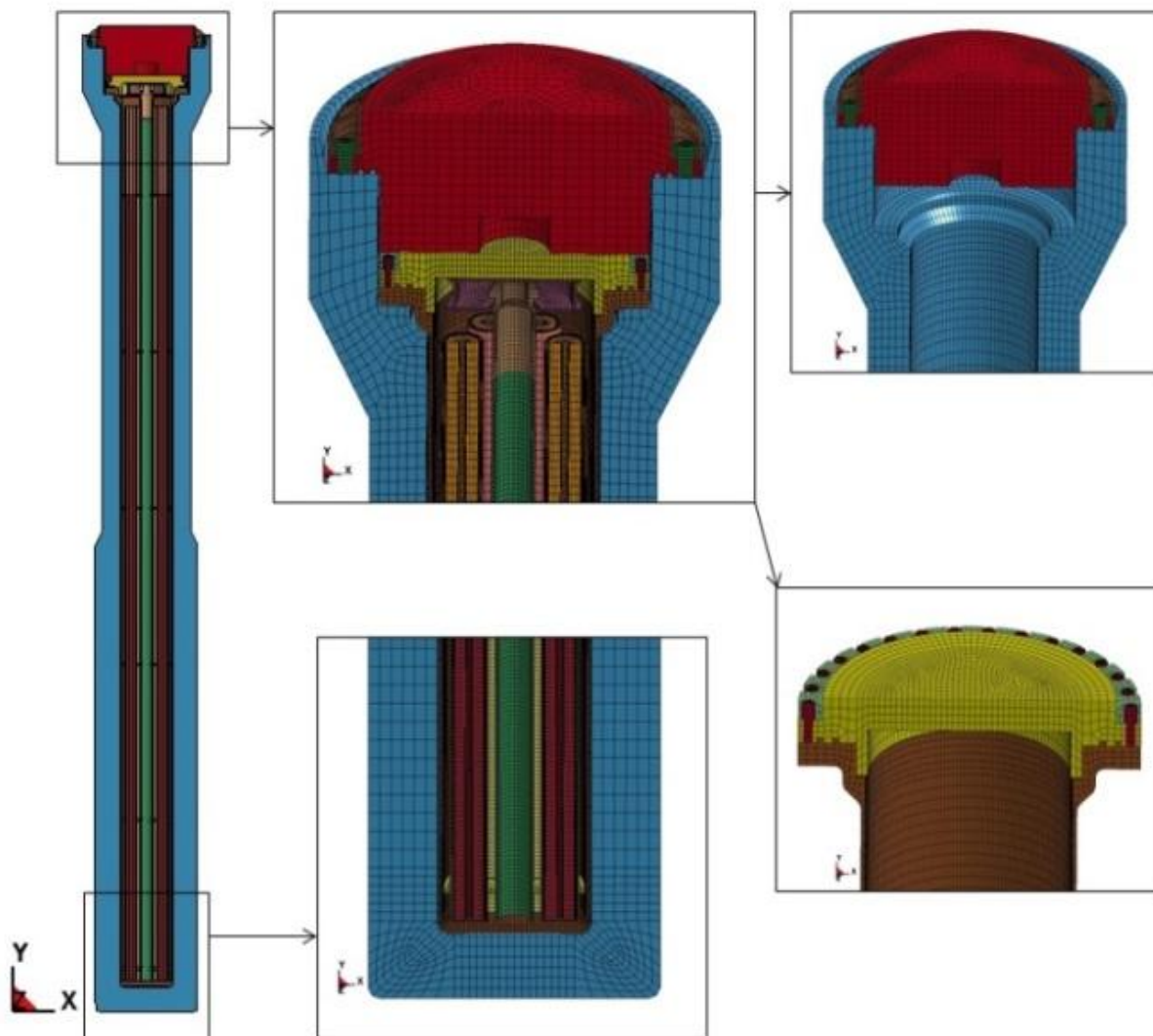


Рисунок 2 – КЭМ ТУК [Finite-element model of TPS]

Для оценки состояния ТУК при нормальных условиях транспортировки был выполнен модальный анализ [5]. Перевозка ТУК будет осуществляться в горизонтальном положении. На данный момент условия закрепления ТУК в транспортном средстве (ТС) достоверно не известны. Поэтому было рассмотрено два случая закрепления ТУК:

- опирание упаковки по двум краям – в области боковых поверхностей фланца и глухого торца;
- опирание упаковки по двум краям и в средней части – по краю утолщенной оболочки корпуса.

В результате расчета получены собственные частоты колебаний конструкции: в первом случае – $f_2=45$ Гц, во втором случае $f_3=145$ Гц. Величина f_2 близка к верхней границе диапазона транспортных частот $f_m \leq 40$ Гц [6], что может сказаться на увеличении динамичности ТУК при транспортировании. Величина f_3 достаточно удалена от диапазона транспортных частот, поэтому при перевозке рекомендуется использовать опирание упаковки по трем областям – двум краям и в средней части.

При расчетах на аварийные падения упаковки с высоты 9 м нагружение ТУК моделировалось заданием всем узлам конструкции начальной скорости 13,3 м/с, а

падение с высоты 1 м – заданием скорости 4,43 м/с. Указанные скорости соответствуют моменту столкновения упаковки с преградой.

Оценка состояния СГ (целостности герметизирующего контура) проводилась по следующим критериям [7-9]:

– по остаточным деформациям:

$$\varepsilon^{\max} \leq \delta, \quad (1)$$

– по растягивающим напряжениям в местах расположения сварных соединений:

$$\sigma_1^{\max} \leq \sigma_{св.}, \quad (2)$$

где $\varepsilon^{\max}$ – максимальная остаточная деформация, %;

δ – относительное удлинение материала, %;

$\sigma_1^{\max}$ – максимальное растягивающее напряжение, МПа;

$\sigma_{св.}$ – предел прочности сварного шва, рассчитывается по формуле [10, 11]:

$$\sigma_{св.} = k \cdot \sigma_{\sigma}, \quad (3)$$

где k – коэффициент ослабления материала сварного шва, $k = 0,9$;

σ_{σ} – предел прочности материала, $\sigma_{\sigma} = 430$ МПа.

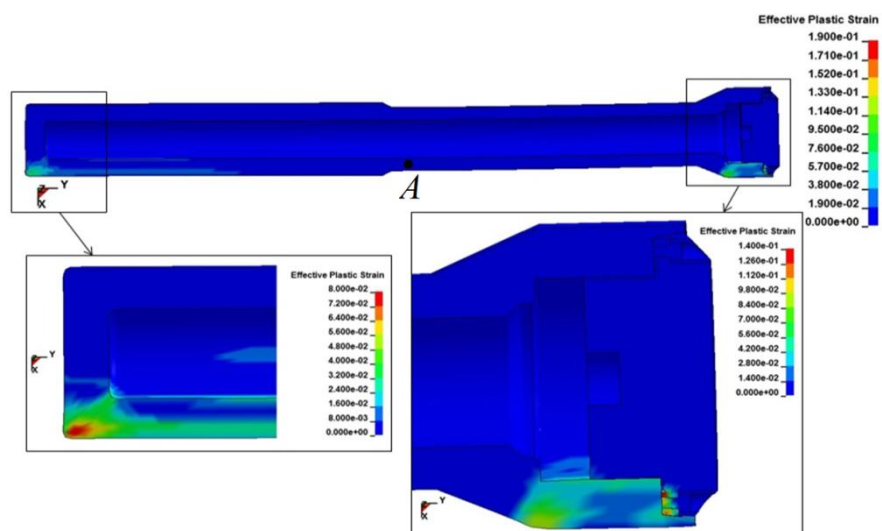
То есть предел прочности сварного шва равен $\sigma_{св.} = 387$ МПа.

Для сварных швов наиболее опасным случаем аварийного падения является падение боковой поверхностью с высоты 9 м. В наиболее нагруженном сварном шве (т. А на рис. 3а) растягивающие напряжения не превосходят предел прочности сварного шва ($\sigma_1 = 374,8$ МПа $< \sigma_{св.} = 387$ МПа). То есть отсутствует угроза разрыва сварного соединения.

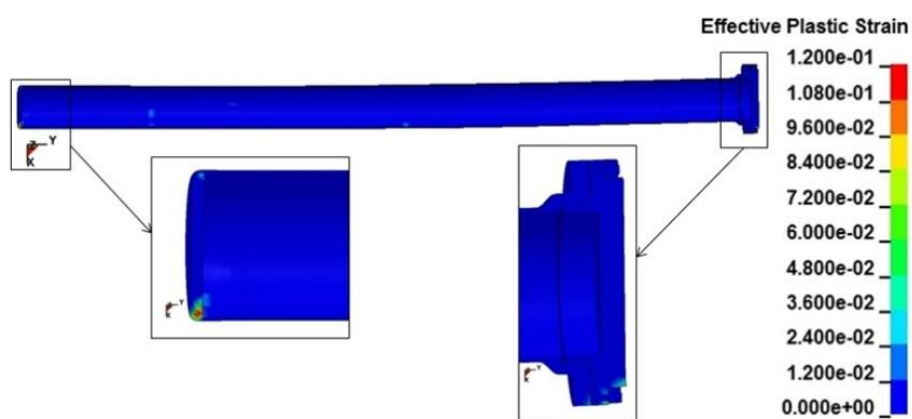
Остаточные деформации контейнера и пенала меньше относительного удлинения (для крышки контейнера – $\varepsilon^{\max} = 19 \% \leq \delta = 35 \%$, для корпуса контейнера – $\varepsilon^{\max} = 9,8 \% \leq \delta = 19 \%$, для пенала – $\varepsilon^{\max} = 12 \% < \delta = 35 \%$), а для одной шпильки деформации превосходят параметр $\delta = 11 \%$ (см. рисунок 3). Возможное разрушение шпильки не повлияет на разгерметизацию контейнера. Коэффициент запаса прочности по деформациям составляет не менее 1,1.

Для элементов конструкции ТУК наиболее опасным случаем является падение углом крышки с высоты 9 м. Наибольшие деформации контейнера превышают относительное удлинение, но это не приведет к разгерметизации, поскольку область максимальных деформаций локализуется на краю в области сжатия (см. рис. 4). В герметизирующем контуре деформации составляют не более 17,5 %, что меньше параметра $\delta = 19 \%$ для материала крышки контейнера. Деформации пенала удовлетворяют требованиям прочности ($\varepsilon^{\max} = 15,8 \% \leq \delta = 35 \%$), а в одной шпильке деформации превышают δ . То есть, возможно, разрушение одной шпильки контейнера. При этом нарушение герметичности упаковки не произойдет, поскольку плотность стыка сохраняется. Прочность элементов упаковки обеспечивается с минимальным коэффициентом запаса по деформациям 1,1.

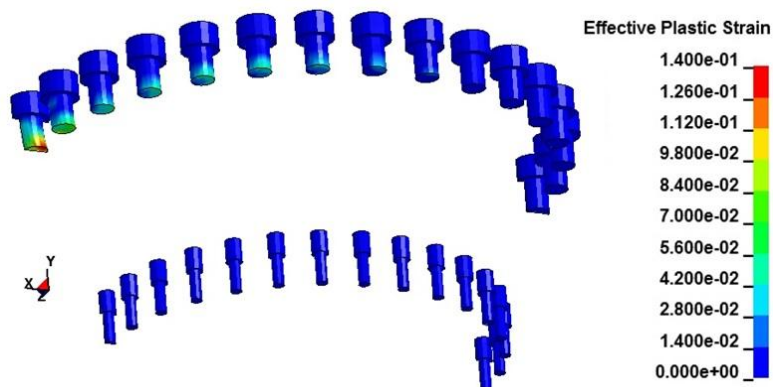
В наиболее нагруженном сварном шве (т. А на рис. 4а) растягивающие напряжения достигают 348,86 МПа, что меньше предела прочности $\sigma_{св.} = 387$ МПа. Прочность сварных соединений обеспечивается с коэффициентом запаса не менее 1,1.



а) контейнер [container]

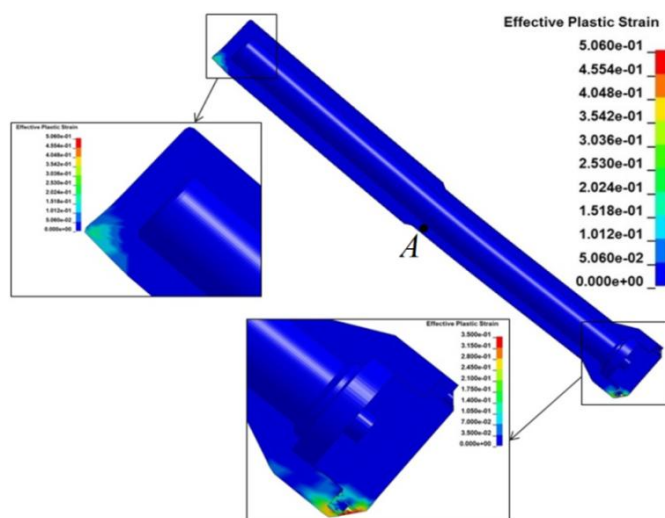


б) пенал [case]

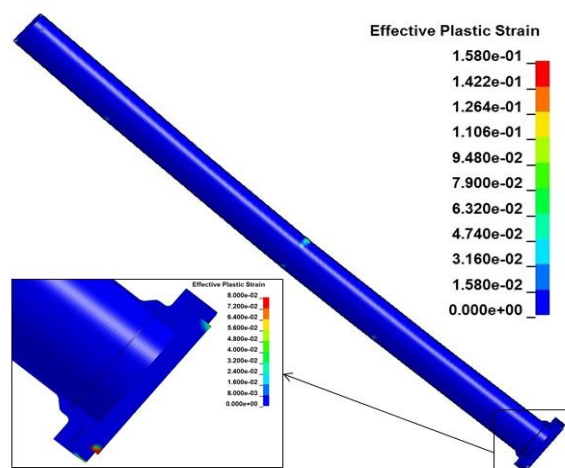


в) шпильки [stud-bolts]

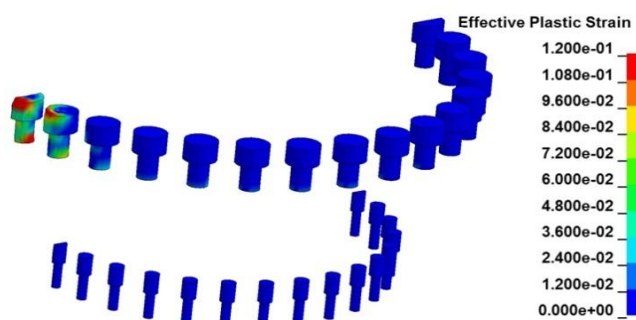
Рисунок 3 – Пластические деформации при падении ТУК боком с высоты 9 м [Plastic deformations when TPS falls sideways from height of 9 m]



а) контейнер [container]



б) пенал [case]



в) шпильки [stud-bolts]

Рисунок 4 – Пластические деформации при падении углом крышки с высоты 9 м [Plastic deformations when the cover corner falls from height of 9 m]

В остальных случаях падения прочность конструкции упаковки обеспечивается со следующими коэффициентами запаса:

– при падении крышкой с высоты 9 м коэффициент запаса для ТУК – $n_{min} = 3,4$, для сварных соединений – $n_{min} = 3,2$;

- при падении крышкой на штырь коэффициент запаса для ТУК – $n > 50$, для сварных соединений – $n_{min} = 16,5$;
- при падении боком на штырь коэффициент запаса для ТУК – $n_{min} = 15,8$, для сварных соединений – $n_{min} = 3,4$;
- при падении углом крышки коэффициент запаса для ТУК и сварных соединений – $n_{min} = 1,3$.

Таким образом, по результатам выполненных вычислений можно сделать следующие выводы. Крепление ТУК в ТС рекомендуется осуществлять в трех местах: по фланцу, боковой поверхности глухого торца и по краю утолщенной оболочки. При таком креплении отсутствует вероятность возникновения резонанса, поскольку собственная частота колебаний конструкции превышает диапазон транспортных частот.

В результате расчетов выявлено, что в условиях аварийных падений упаковки с высоты 9 м на горизонтальную поверхность и при падении на штырь с высоты 1 м герметичность ТУК (пенала и контейнера) сохраняется, благодаря чему гарантируется безопасность транспортировки ОТВС.

Следовательно, конструкция ТУК удовлетворяет нормативным требованиям прочности и безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов» (НП-053-16) [Текст] / Москва : Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2016. – 173 с.
2. ГОСТ 1050-2013. Металлоконструкция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. [Текст] / Введ. 2015.01.01. – Москва : Стандартиформ, 2014. – 32 с.
3. ГОСТ 25054-81. Поковки из коррозионностойких сталей и сплавов. Общие технические условия. [Текст]. – введ. 1983.01.01. – Москва : Изд-во стандартов, 2003. – 33 с.
4. ГОСТ 4543-2016. Металлоконструкция из конструкционной легированной стали. Технические условия. [Текст]. – введ. 2017.10.01. – Москва : Стандартиформ, 2017. – 50 с.
5. LS-DYNA: Руководство пользователя [Текст] / Под ред. Б.Г. Рубцова. – Снежинск, 2000. – 160 с.
6. Челомей, В.Н. Вибрации в технике: Справочник [Текст]: В 6-ти томах/ В.Н. Челомей. Под ред. К.В. Фролова. – Защита от вибраций и ударов, Москва : Машиностроение, 1981. – Т.6. – 456 с.
7. Феодосьев, В.И. Соппротивление материалов [Текст] / В.И. Феодосьев – 16-е изд., испр. – Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 543 с.
8. Соппротивление материалов: учебник для вузов [Текст] / Под ред. Писаренко Г.С. – 5-е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища шк., 1986. – 696 с.
9. Иванов, М.Н. Детали машин [Текст] / М.Н. Иванов. – 3-е изд., доп. и перераб. – Москва : Высшая школа, 1976. – 388 с.
10. Биргер, И.А. и др. Расчет на прочность деталей машин: Справочник [Текст] / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1993. – 640 с.
11. Решетов, Д.Н. Детали машин [Текст] / Д.Н. Решетов – 4-е изд., доп. и перераб. – Москва : Машиностроение, 1989. – 496 с.

REFERENCES

- [1] Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj ehnergii «Pravila bezopasnosti pri transportirovanii radioaktivnyh materialov» (NP-053-16) [Federal Norms and Rules in the Field of Atomic Energy Use «Safety Rules at Transportation of Radioactive Materials» (NR-053-16)]. Moscow. Federal'naya sluzhba po ehkologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru [Federal Agency of Ecological, Technological and Nuclear Supervision]. 2016. 173 p. (in Russian).

- [2] GOST 1050 – 2013. Metallokonstrukciya iz neligirovanneh konstrukcionnyh kachestvennyh i special'nyh staley. Obschie tekhnicheskie usloviya. [Metalware from Unalloyed Constructional Qualitative and Special Steels. The General Specifications]. Moscow. Standartinform [Standartinform Publishing House]. 2014. 32 p. (in Russian).
- [3] GOST 25054-81. Pokovki iz korrozionnostoykih staley i splavov. Obschie tekhnicheskie usloviya. [Forged Piece from Corrosion-Proof Steels and Alloy Materials. The General Specifications]. Moscow. Izdatelstvo standartov [Standartinform Publishing House]. 2003. 33 p. (in Russian).
- [4] GOST 4543-2016. Metallokonstrukciya iz konstrukcionnoy legirovannoy stali. Tekhnicheskie usloviya. [Metalware from Constructional Alloyed Steel. The Specifications]. Moscow. Standartinform [Standartinform Publishing House]. 2017. 50 p. (in Russian).
- [5] LS-DYNA: Rukovodstvo pol'zovatelya [LS-DYNA: user guide]. Snezhinsk, 2000, 160 p. (in Russian)
- [6] Vibracii v tekhnike: Spravochnik. T.6: Zashchita ot vibratsiy i udarov [Vibrations in Equipment: Reference book. vol.6: Protection against Vibrations and Impacts]. Moscow. Pub. Mashinostroenie [Mechanical Engineering]. 1981. 456 p. (in Russian).
- [7] Pheodosyev V.I. Soprotivlenie materialov [Resistance of Materials]. Moscow. Pub. Izdatelstvo MGTU im. N.A.Baumana [Publishing House of MSTU]. 2016. 543 p. (in Russian).
- [8] Soprotivlenie materialov [Resistance of Materials – edited by Pisarenko G.S.]. Kiev. Pub. Vischa shkola [Higher School]. 1986. 696 p. (in Russian).
- [9] Ivanov M.N. Detali mashin [Machine elements]. Moscow. Pub. Vysshaja shkola [Higher School]. 1976. 388 p. (in Russian).
- [10] Birger I.A. etc. Raschet na prochnost detaley mashin: Spravochnik [Strength Calculation of Machine Elements. Reference book]. Moscow. Pub. Mashinostroenie [Mechanical Engineering]. 1993. 640 p. (in Russian).
- [11] Reshetov D.N. Detali mashin [Machine Elements]. Moscow. Pub. Mashinostroenie [Mechanical Engineering]. 1989. 496 p. (in Russian).

Validation of the Transport Packing Set Compatibility to Safety Requirements

Yu.Yu. Lushina^{*1}, O.Yu. Zhabunina^{2}, N.Yu. Parshukova^{*3}**

** Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPhI, Snezhinsk, Russia*

*** Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics», Snezhinsk, Russia*

¹ORCID: 0000-0002-3328-3989

Researcher ID: W-3732-2017

e-mail: yulyaledy94@mail.ru

²ORCID: 0000-0001-9823-3651

e-mail: O.S.Putilin@vniitf.ru

³ORCID: 0000-0001-9872-8996

Researcher ID: W-3192-2017

e-mail: p.i.e@yandex.ru

Abstract – The aim of the article is the computational validation of compatibility of the developed transport packing set (TPS) to normative safety requirements in the conditions of land transportation of used fuel assemblies (UFA). The safety of UFA transportation should be confirmed by TPS tightness preservation at emergency falling from height of 9 m on a horizontal surface and from height of 1 m on the pin with circular section. The mentioned tests are simulated by numerical calculations in the finite-element analysis program which shows that suggested TPS construction meets normative requirements.

Keywords: safety, transportation, used fuel assemblies, radioactive material, dangerous cargo, transport packing set, tightness, hermetic sealing system, container, case, finite-element analysis program, strength.

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 004.056.53

**АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ОТ
ПЕРЕПОЛНЕНИЯ БУФЕРА НА СТЕКЕ И СПОСОБЫ ИХ ОБХОДА**

© 2019 М.А. Паринов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Проблема выявления и предотвращения атак на приложения была и остается одной из актуальных задач информационной безопасности. Изъяны в коде программ приводят к нарушению нормальной работы программного обеспечения. Из-за недочетов разработки могут возникать нарушения целостности, доступности и конфиденциальности данных, прерывание выполнения запущенных процессов или даже системы в целом. В данной работе рассматривается механизм совершения переполнения буфера на стеке, а также существующие современные средства обнаружения или предотвращения переполнения буфера, такие как ASLR, StackGuard и неисполняемый стек. Данные средства защиты выбраны в качестве цели исследования из-за того, что они являются самыми распространёнными и являются встроенными средствами защиты в ОС Linux. Целью работы является анализ проблемы переполнения буфера и неполной эффективности, существующих повсеместно используемых средств предотвращения и обнаружения данного типа атак, а также описание альтернативного способа решения проблемы переполнения буфера. В рамках работы для каждого из широко распространенных средств защиты рассмотрен способ его обхода. Итогом данной работы стало заключение, что существующие средства защиты имеют существенные недостатки и поэтому требуется разработка дополнительного средства защиты, идея которого предложена в конце статьи.

Ключевые слова: переполнение буфера, системные вызовы, инъекции кода, неисполняемый стек, StackGuard, ASLR, информационная безопасность.

Поступила в редакцию: 12.04.2019

После доработки 22.04.2019

Принята к публикации 26.04.2019

ВВЕДЕНИЕ

Проблема выявления и предотвращения атак на приложения была и остается одной из актуальных задач информационной безопасности. Корректная разработка приложения является одним из способов решения данной проблемы, так как небольшая ошибка разработчика в умелых руках злоумышленника может привести к непредсказуемым последствиям.

Изъяны в коде программ приводят к нарушению нормальной работы программного обеспечения. Из-за недочетов разработки могут возникать нарушения целостности, доступности и конфиденциальности данных, прерывание выполнения запущенных процессов или даже системы в целом. Большинство уязвимостей программного обеспечения связано с неправильной обработкой данных, получаемых из сторонних (внешних) источников, или недостаточно строгой их проверкой.

Первый случай использования переполнения стекового буфера произошел более тридцати лет назад вредоносной программой названной Червем Мориса в 1988 году. Он использовал переполнение буфера в демоне UNIX для перемещения от одного компьютера к другому. С тех пор было придумано множество механизмов защиты, но по сей день, проблема остается актуальной.

ПЕРЕПОЛНИЕ БУФЕРА

Для начала рассмотрим механизм переполнения буфера. На рисунке 1 приведен простейший пример уязвимой программы на языке программирования С. Ошибкой в этом примере является отсутствие проверки длины входных данных считываемых в строковую переменную buf [1].

```
#include <stdio.h>
#include <string.h>
int main(int argc, char** argv)
{
    char buf[200];
    strcpy(buf, argv[1]);
    return 0;
}
```

Рисунок 1 – Пример программы на языке С уязвимой к переполнению буфера на стеке [C language program example vulnerable to buffer overflow on the stack]

Если на ввод подать строку длиной менее 200 байт, то программа работает корректно [2-3]. Однако если подать строку размером больше буфера, то получится ошибка сегментации [4-5]. На рисунке 2 изображен момент атаки путем переполнения стекового буфера.

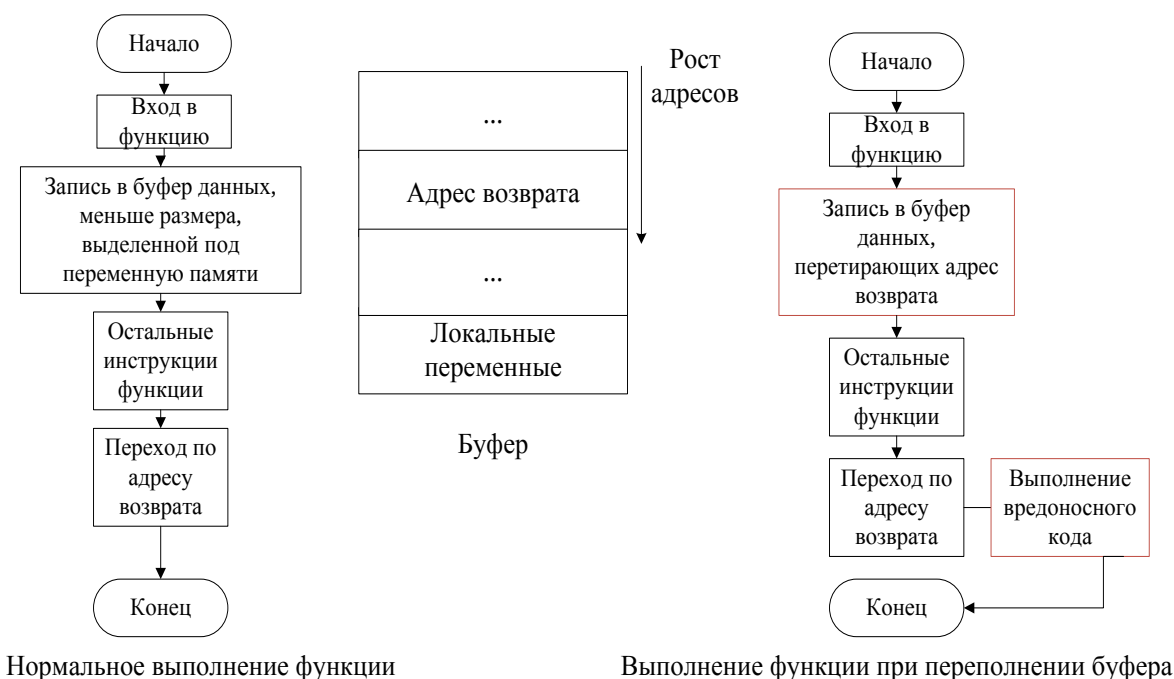


Рисунок 2 – Алгоритмы нормального выполнения функции и выполнения функции в момент атаки путем переполнения стекового буфера [Algorithms of normal function execution and its execution at the moment of an attack by stack buffer overflow]

STACKGUARD

StackGuard был выпущен в свет в 1998 г., как расширение к GCC для защиты программного обеспечения от переполнения буфера на стеке. Целью StackGuard является проверка целостности адреса возврата, который злоумышленник попытается переписать адресом нужного ему исполняемого кода [6].

Для своевременной проверки изменения адреса возврата, она должна происходить перед возвратом функции. Для этого StackGuard помещает контрольную информацию, так называемую канарейку (Canary word), непосредственно перед адресом возврата (рис. 2). Таким образом, при попытке перезаписать адрес возврата, злоумышленник автоматически переписет канарейку, проверка которой происходит непосредственно перед передачей управления по адресу возврата [7].

Верх стека
Адрес возврата
Канарейка
Локальные переменные

Рисунок 3 – Пример расположения канарейки в стеке [An example of Canary word location on the stack]

Существует три типа канареек.

Канарейка с использованием символов конца строки – подразумевает, что большинство переполнений происходит на строках. Поэтому используя четыре разных символа конца строки можно предотвратить разовое переписывание памяти, так как один или несколько символов прекратят строковую операцию. Однако если атакующий сможет переписать стек несколько раз, то он сможет заменить защищенную контрольную информацию и адрес возврата.

Случайная канарейка – обнаруживает все перезаписи памяти при условии, что атакующий не знает значение канарейки. Значение хранится в глобальной переменной, которая инициализируется в новое значение при каждом запуске программы.

Случайная XOR канарейка – используется при условии, если злоумышленник может переписывать память в случайном месте. В дополнении к случайной канарейке часть или все защищаемые данные шифруются с использованием исключающего «или» с значением канарейки. Уязвимости аналогичны случайной канарейке.

ОБХОД STACKGUARD

Существуют несколько слабостей реализации.

Во-первых, в угоду производительности также существуют незащищенные функции. Например, компилятор gcc защищает функции, имеющие строковые буферы размером более 4 элементов.

Во-вторых, если в системе существует уязвимость утечки памяти, то в независимости от типа канарейки атакующий может переписать указатель предыдущего фрейма, где будет располагаться адрес возврата кода атакующего и правильная канарейка.

Рассмотрим возврат с изменённым указателем предыдущего фрейма более подробно.

По умолчанию StackGuard использует прерывающую канарейку. Ее значение 0x000aff0d. Таким образом, мы не можем переписать адрес возврата. Однако мы можем переписать указатель предыдущего фрейма. Это означает, что мы можем в стеке или куче разместить конструкцию вида (0x000aff0d; Новый адрес возврата) и при возврате к вызвавшей функции указатель фрейма будет смещен на нужный нам адрес и после ее выполнения канарейка останется неизменной, но адрес возврата будет модифицирован адресом известного нам заранее подготовленного вредоносного кода [8].

Также в качестве альтернативных методов обхода стоит упомянуть о таких способах как предугадывание канарейки и использование слабостей реализации.

НЕИСПОЛНЯЕМЫЙ СТЕК

Переполнение буфера обычно производится путем инъекции кода в уязвимое приложение, к которому перейдет управление после того как будет переписан изначальный адрес возврата [9]. Этот код обычно помещается в кучу или стек. Что бы предотвратить выполнение вредоносного кода, все страницы данных процесса помечаются как неисполняемые. Страницы, содержащие код, помечаются как защищенные от записи, поэтому злоумышленник не может модифицировать существующий или вставить свой код. Такая технология так же известна как неисполняемый стек (Data Execution Prevention-DEP).

Одним из достоинств данной технологии является то, что она не влияет на производительность. Так же стоит заметить, что DEP можно применить к уже существующим программам, однако могут возникнуть проблемки с JIT (Just-in-time compilation- компиляции непосредственно во время работы программы) компиляторами (например, Java) которые генерируют исполняемый код в памяти во время исполнения, что требует разрешения и на запись в память и на исполнение [10].

ОБХОД С ВОЗВРАТОМ В БИБЛИОТЕКУ

С тех пор, как появился DEP, проведение атак с внедрением произвольного кода стало почти невозможным, но атакующие нашли другой способ обхода данной защиты. Основная идея заключается в том, что большинство библиотек уже размещены в памяти процесса и содержат большое количество кода, который злоумышленник может использовать по своему желанию. Базовым примером может служить функция `system`, с помощью которой злоумышленник может запустить командную оболочку `linux (sh)`, непосредственно в которой он может исполнить произвольный код (`ret2libc`). С тех пор как функция `system` является частью библиотеки `libc`, атакующему больше не требуется внедрять свой собственный код, а можно использовать существующие возможности библиотечных функций. Другим вариантом обхода является использование функции `mprotect` для пометки стека или кучи как исполняемой и уже использовать расположенный в ней атакующим вредоносный код [11].

На основании атаки `ret2libc` появилась еще одна техника, называемая Return Oriented Programming (Возвратно ориентированное программирование).

Одним из способов защиты от `Ret2libc` является удаление потенциально опасных функций, однако для ROP это не имеет значения, если быть точнее, то для совершения данной атаки даже не нужно вызывать какие-либо функции. В концепции данной атаки мы будем использовать небольшие последовательности ассемблерных команд, называемых гаджетами, расположенных в исполняемом файле либо в библиотеке, связанной с ним. В общем, вместо возврата к адресу функции в библиотеке мы будем использовать возврат к данным последовательностям [12].

Для того что бы найти данные гаджеты мы должны найти в уязвимом приложении все `get` инструкции и посмотреть предыдущие инструкции на наличие нужных нам ассемблерных инструкций.

Данные гаджеты могут использоваться для следующих действий:

- Загрузка константы в регистр – позволяет сохранить верхнее значение в стеке в регистр `eax`, используя `rop` инструкцию. Такая последовательность выглядит как `Rop eax;ret;`. Эта последовательность позволит нам передать управление к следующему гаджету.

- Чтение из памяти – например, `mov ecx,[eax];ret` – переписывает `ecx` значением, расположенным по адресу, хранящемуся в `eax`.

- Запись в память – например, `mov [eax],ecx;ret`.

- Арифметические операции, такие как сложение, умножение, исключение или и т.д., например `xor eax,ebx;ret`.

– Системные вызовы – инструкции, позволяющие нам выполнить прерывание, например, `int 0x80;ret` или `call gs:[0x10];ret`

Например, вредоносный код, построенный на основе таких гаджетов и изображенный на рисунке 4 [9] запускает `sh` с помощью системного вызова `execve`.

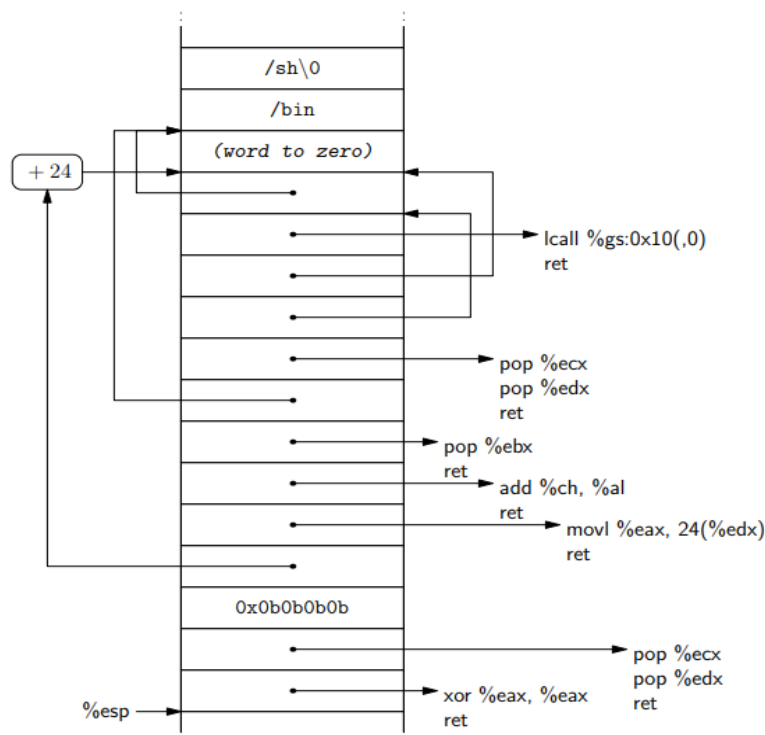


Рисунок 4 – Вредоносный код, запускающий `sh`, собранный из гаджетов, найденных в уязвимом приложении [Malicious code that runs `sh`, compiled from gadgets found in a vulnerable application]

ASLR

Address Space Layout Randomization – широко распространённая технология, которая защищает систему от определенного типа атак путем рандомизации позиции ключевых компонентов программы в виртуальной памяти. Защите подлежат адреса сегментов данных и кода, стека, кучи, а также используемых библиотек [13]. Для примера, если атакующий смог успешно нарушить поток управления программы, ему будет сложно использовать возвратно ориентированное программирование при наличии ASLR, потому что адреса гаджетов для инъекции в стек будут не известны из-за рандомизации [14]. Использование подбора для поиска адреса нужного гаджета может привести к краху программы или занять большое количество времени.

За время существования ASLR было разработано множество вариантов обхода, среди которых стоит выделить:

- `data leak` – дополнительная уязвимость утечки данных позволяющие злоумышленнику получить нужные адреса;
- Относительная адресация;
- Слабости реализации;
- Побочные эффекты работы аппаратуры [15].

Примером обхода ASLR может являться техника схожая с `ret2libc`, которая называется `ret2plt`. PLT- Procedure Linkage Table состоит из адресов внешних функций, чьи адреса не известны во время компиляции и составляется динамическим линковщиком во время исполнения. Стоит заметить, что нахождение таблицы PLT не меняется при использовании ASLR, что позволяет нам легко вызвать любую из функций используемых уязвимой программой функций с возвратом в PLT вместо стандартного возврата в `libc` [16] [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрен простейший способ совершения атак с использованием переполнения буфера, а также существующие средства по обнаружению и предотвращению атак на приложения. Ни один из представленных и широко используемых механизмов защиты не может гарантировать предотвращение атак на приложения ввиду слабостей своей реализации. Например, способом обхода StackGuard является техника перетирания указателя текущего фрейма. Для неисполняемого стека предложена технология возврата в библиотеку (ret2libc) основанная на вызове системных функций и ее модификации. Для обхода ASLR используются техника схожая с ret2libc, но с возвратом в Procedure Linkage Table. Данные способы обходов представленных систем защиты далеко не единственные и существует еще множество способов обхода, в том числе способов обхода сразу нескольких систем предотвращения и обнаружения атак на приложения. Стоит заметить, что данные системы сильно уменьшают возможность проведения атак, однако не известно, сколько возможностей остается для совершения атаки, что приводит к выводу, что для обеспечения полной безопасности требуется или усовершенствовать существующие системы, или создавать новую в дополнение к текущим.

В качестве системы по предотвращению атак на приложения предлагается создать программный комплекс по предотвращению атак на приложения путем проверки совершаемых ими системных вызовов. Проверка корректности совершаемого системного вызова предлагается строить на основе эталонной модели защищаемого приложения. Для получения эталонной модели поведения защищаемого конкретного приложения предлагается анализировать его исходные коды и собирать информацию о номерах и порядке совершаемых им системных вызовов. Такой метод защиты поможет предотвратить класс атак переполнения буфера приводящих к инъекции вредоносного кода в ОС Linux.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aleph One Smashing The Stack For Fun And Profit [Электронный ресурс]. URL: http://www-inst.eecs.berkeley.edu/~cs161/fa08/papers/stack_smashing.pdf (дата обращения: 13.07.2018).
2. *Альфред, В. Ахо* Компиляторы. Принципы, технологии и инструментарий / В. Ахо Альфред, С. Лам Моника, Сети Рави, Д. Ульман Джеффри; пер. с англ. И. Красиков. – Москва : Вильямс, 2008 – 1184 с.
3. Donald E. Porter, Emmett Witchel. Transactional system calls on Linux [Электронный ресурс]. URL : <http://www.cs.unc.edu/~porter/pubs/ols10.pdf> (дата обращения: 15.09.2018).
4. Michal Sojka. Kernel side of system calls [Электронный ресурс]. URL: <http://labe.felk.cvut.cz/~stepan/33OSD/files/osd-e3-kern-syscall.pdf> (дата обращения: 12.08.2018).
5. *Стюгин, М.А.* Способ построения программного кода с неразличимой функциональностью. [Электронный ресурс] / М.А. Стюгин // Безопасность информационных технологий. – 2017. – Вып. 24. – № 1. – С. 66-72. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/57> (дата обращения: 1.11.2018) doi:<http://dx.doi.org/10.26583/bit.2017.1.08>.
6. Crispan Cowan, Calton Pu, Dave Maier, Jonathan Walpole, Peat Bakke, Steve Beattie, Aaron Grier, Perry Wagle, and Qian Zhang «StackGuard: Automatic Adaptive Detection and Prevention of Buffer-Overflow Attacks» [Электронный ресурс]. URL: https://www.usenix.org/legacy/publications/library/proceedings/sec98/full_papers/cowan/cowan.pdf (дата обращения: 1.09.2018).
7. Perry Wagle, Crispin Cowan «StackGuard: Simple Stack Smash Protection for GCC» [Электронный ресурс]. URL: <ftp://gcc.gnu.org/pub/gcc/summit/2003/Stackguard.pdf> (дата обращения: 30.07.2018).
8. Gerardo Richarte «Four different tricks to bypass StackShield and StackGuard protection» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cs.purdue.edu/homes/xyzhang/spring07/Papers/defeat-stackguard.pdf> (дата обращения: 6.08.2018).

9. Hovav Shacham. The Geometry of Innocent Flesh on the Bone: Return-into-libc without Function Calls (on the x86) [Электронный ресурс]. URL: <https://hovav.net/ucsd/dist/geometry.pdf> (дата обращения: 21.10.2018).
10. Erik Buchanan, Ryan Roemer, Stefan Savage, Hovav Shacham «Return-oriented Programming: Exploitation without Code Injection» [Электронный ресурс]. URL: https://www.blackhat.com/presentations/bh-usa-8/Shacham/BH_US_08_Shacham_Return_Oriented_Programming.pdf (дата обращения: 22.10.2018).
11. Erik Buchanan, Ryan Roemer, Hovav Shacham, Stefan Savage «When Good Instructions Go Bad: Generalizing Return-Oriented Programming to RISC» [Электронный ресурс]. URL: <http://cseweb.ucsd.edu/~savage/papers/CCS08GoodInstructions.pdf> (дата обращения: 22.10.2018).
12. Reed Hastings, Bob Joyce «Purify: Fast Detection of Memory Leaks and Access Errors» [Электронный ресурс]. URL: <https://web.stanford.edu/class/cs343/resources/purify.pdf> (дата обращения: 23.10.2018).
13. Tyler Durden «Bypassing PaX ASLR protection» [Электронный ресурс]. URL: <http://phrack.org/issues/59/9.html> (дата обращения: 9.11.2018).
14. Hector Marco, Ismael Ripoll «AMD Bulldozer Linux ASLR weakness: Reducing entropy by 87.5%» [Электронный ресурс]. URL: <http://hmarco.org/bugs/AMD-Bulldozer-linux-ASLR-weakness-reducing-mmaped-files-by-eight.html> (дата обращения: 9.11.2018).
15. Tilo Muller «ASLR Smack & Laugh Reference» [Электронный ресурс]. URL: <https://ece.uwaterloo.ca/~vganesh/TEACHING/S2014/ECE458/aslr.pdf> (дата обращения: 10.11.2018).
16. Ralf Hund, Carsten Willems, Thorsten Holz «Practical Timing Side Channel Attacks Against Kernel Space ASLR» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ieee-security.org/TC/SP2013/papers/4977a191.pdf> (дата обращения: 10.11.2018).
17. Dmitry Evtushkin, Dmitry Ponomarev, Nael Abu-Ghazaleh «Jump Over ASLR: Attacking Branch Predictors to Bypass ASLR» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cs.ucr.edu/~nael/pubs/micro16.pdf> (дата обращения: 01.12.2018).

REFERENCES

- [1] Aleph One. Smashing The Stack For Fun And Profit. URL: http://www-inst.eecs.berkeley.edu/~cs161/fa08/papers/stack_smashing.pdf.
- [2] Al`fred V. Axo, S. Lam Monika, Seti Ravi, D. Ul`man Dzheffri. Kompilyatory`. Principy`, texnologii i instrumentarij. Moskva. Vil`yams [Compilers: Principles, Techniques and Tools]. 2013. 1040 p. (in Russian).
- [3] Donald E. Porter, Emmett Witchel. Transactional system calls on Linux. URL: <http://www.cs.unc.edu/~porter/pubs/ols10.pdf> (in Russian).
- [4] Michal Sojka. Kernel side of system calls. URL: <http://labe.felk.cvut.cz/~stepan/33OSD/files/osd-e3-kern-syscall.pdf>.
- [5] Styugin M.A. Sposob postroeniya programmnoy koda s nerazlichimoy funkcional`nost`yu. Bezopasnost` informacionny`x texnologij [The Method of Generation Program Code with Indistinguishable Functionality. IT Security]. [S.I.]. V. 24. №. 1. P. 66-72, apr. 2017. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/57> (in Russian). doi:<http://dx.doi.org/10.26583/bit.2017.1.08>.
- [6] Crispian Cowan, Calton Pu, Dave Maier, Jonathan Walpole, Peat Bakke, Steve Beattie, Aaron Grier, Perry Wagle, and Qian Zhang. StackGuard: Automatic Adaptive Detection and Prevention of Buffer-Overflow Attacks. URL: https://www.usenix.org/legacy/publications/library/proceedings/sec98/full_papers/cowan/cowan.pdf.
- [7] Perry Wagle, Crispian Cowan. StackGuard: Simple Stack Smash Protection for GCC. URL: <ftp://gcc.gnu.org/pub/gcc/summit/2003/Stackguard.pdf>.
- [8] Gerardo Richarte. Four different tricks to bypass StackShield and StackGuard protection. URL: <https://www.cs.purdue.edu/homes/xyzhang/spring07/Papers/defeat-stackguard.pdf> (in English).
- [9] Hovav Shacham. The Geometry of Innocent Flesh on the Bone: Return-into-libc without Function Calls (on the x86). URL: <https://hovav.net/ucsd/dist/geometry.pdf>.
- [10] Erik Buchanan, Ryan Roemer, Stefan Savage, Hovav Shacham. Return-oriented Programming: Exploitation without Code Injection. URL: https://www.blackhat.com/presentations/bh-usa-08/Shacham/BH_US_08_Shacham_Return_Oriented_Programming.pdf.
- [11] Erik Buchanan, Ryan Roemer, Hovav Shacham, Stefan Savage. When Good Instructions Go Bad: Generalizing Return-Oriented Programming to RISC. URL: <http://cseweb.ucsd.edu/~savage/papers/CCS08GoodInstructions.pdf>.

- [12] Reed Hastings, Bob Joyce. Purify: Fast Detection of Memory Leaks and Access Errors. URL: <https://web.stanford.edu/class/cs343/resources/purify.pdf>.
- [13] Tyler Durden. Bypassing PaX ASLR protection. URL: <http://phrack.org/issues/59/9.html>.
- [14] Hector Marco, Ismael Ripoll. AMD Bulldozer Linux ASLR weakness: Reducing entropy by 87.5%. URL: <http://hmarco.org/bugs/AMD-Bulldozer-linux-ASLR-weakness-reducing-mmapped-files-by-eight.html>.
- [15] Tilo Muller. ASLR Smack & Laugh Reference. URL: <https://ece.uwaterloo.ca/~vganesh/TEACHING/S2014/ECE458/aslr.pdf>.
- [16] Ralf Hund, Carsten Willems, Thorsten Holz. Practical Timing Side Channel Attacks Against Kernel Space ASLR. URL: <https://www.ieee-security.org/TC/SP2013/papers/4977a191.pdf>.
- [17] Dmitry Evtvushkin, Dmitry Ponomarev, Nael Abu-Ghazaleh. Jump Over ASLR: Attacking Branch Predictors to Bypass ASLR. URL: <http://www.cs.ucr.edu/~nael/pubs/micro16.pdf>.

Analysis of Existing Protection Systems from Buffer Overflow and Methods of their Bypass

M.A. Parinov

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

¹*ORCID iD: 0000-0002-6947-8753*

WoS Researcher ID: G-9341-2019

e-mail: mafimka@gmail.com

Abstract – The issue of detecting and preventing attacks on applications has been and remains one of the urgent tasks of information security. Flaws in the program code lead to disruption of the normal operation of the software. Data integrity, availability and confidentiality of the data, interruption of the execution of running processes or even the system as a whole may occur due to design flaws. This paper discusses the mechanism of buffer overflow on a stack as well as existing modern means of detecting or preventing buffer overflows such as ASLR, StackGuard, and a non-executable stack. These security features are chosen as the research target because they are the most common and are built-in security features in Linux. The objective of the work is to analyze the problem of buffer overflow and the incomplete effectiveness of existing commonly used means of preventing and detecting this type of attack as well as a description of an alternative way to solve the problem of buffer overflow. As part of the work for each of the widespread means of protection considered a way to circumvent it. The result of this work was the conclusion that the existing security tools have significant drawbacks and therefore requires the development of an additional remedy, the idea of which is proposed at the end of the article.

Keywords: buffer overflow, system calls, code injection, Data Execution Prevention, ASLR, StackGuard, information security.

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

УДК 624.04:624.014

**ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ
ПОЛОГО ЭЛЕМЕНТА**

© 2019 С.А. Ращепкина

*Балаковский инженерно-технологический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», Балаково, Саратовская обл., Россия*

Исследуются стержневые элементы полого поперечного сечения, создаваемые по перспективной технологии, не требующей больших энергетических затрат. На основе численного анализа устойчивости полого элемента при центральном сжатии, выявлено изменение критических сил в зависимости от его поперечных размеров; установлено, что материал стержневого элемента оказывает влияние на критические напряжения; показано, что расчеты устойчивости полого элемента хорошо согласуются с данными экспериментов на моделях.

Ключевые слова: атомная электростанция, металл, полый элемент, расчет, устойчивость, эксперимент.

Поступила в редакцию 14.02.2019

После доработки 06.03.2019

Принята к публикации 22.03.2019

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Экономический кризис в стране сделал тему энергосбережения чрезвычайно актуальной. В основе развития экономики России лежит широкое применение современных энергосберегающих комплексных технологий. Их внедрение вызвано необходимостью экономии энергетических ресурсов на предприятиях разных отраслей, и в целом по нашей огромной стране. Следует отметить, что одним из важнейших способов уменьшить влияние человечества на природу – это квалифицированный, грамотный подход к использованию различных источников энергии путем создания энергосберегающих технологий. Основная роль в этом принадлежит современным энергоемким инновационным технологиям. Внедрение передовых технологий, кроме экологических положительных результатов, приводит к реальной экономии по многим показателям, в то числе по уменьшению расходов, связанных с энергетическими затратами. В текущее время энергосбережение и энергосберегающие технологии тесно взаимосвязаны и становятся одними из приоритетов политики текущего времени [1-3].

В статье исследуются инновационные стержневые элементы полого поперечного сечения, создаваемые по перспективной технологии, не требующей больших энергетических затрат [4-6]. Разработанный тип элементов может быть рекомендован к применению в оросителях градилен и брызгательных бассейнах, в многоячеистых хранилищах для различных веществ, в стойках эстакад, переходных площадок, несущих элементах дымовых труб, а также в набережных гидротехнических сооружений [7].

Выполнение сварных тонкостенных конструкций в настоящее время не имеет проблем. Существуют различные агрегаты и оборудование для их качественного выполнения. Поэтому предлагаемые автором полые стержневые элементы легко изготавливаются с применением различных видов сварки [9, 10].

Представим вертикальный тонкостенный стержень (оболочечный элемент) полого поперечного сечения, соединенный сверху, внизу жестко или шарнирно и по образующим определенным образом. Рассматриваемые полые стержневые элементы относятся к длинным цилиндрическим оболочкам. Власов В.З. назвал такие оболочки тонкостенными стержнями [8]. Полую оболочку закрытого профиля можно рассматривать как две оболочки (два тонкостенных стержня) открытого профиля (рис. 1). Теория тонкостенных стержней построена на гипотезах, включающих две важнейшие формулировки представленных в работе [8]:

а) тонкостенный стержень открытого профиля рассматривается как оболочка, обладающая в плоскости поперечного сечения жестким (недеформируемым) профилем;

б) деформация сдвига срединной поверхности стержня, характеризующаяся изменением прямого угла между координатными линиями $z=\text{const}$, $s=\text{const}$, принимается равной нулю.

Проведем исследование тонкостенного полого элемента для случая приложения сжимающей осевой нагрузки. При этом полые элементы на заполнены никаким либо материалом, и внешние горизонтальные силы отсутствуют (рис. 1).

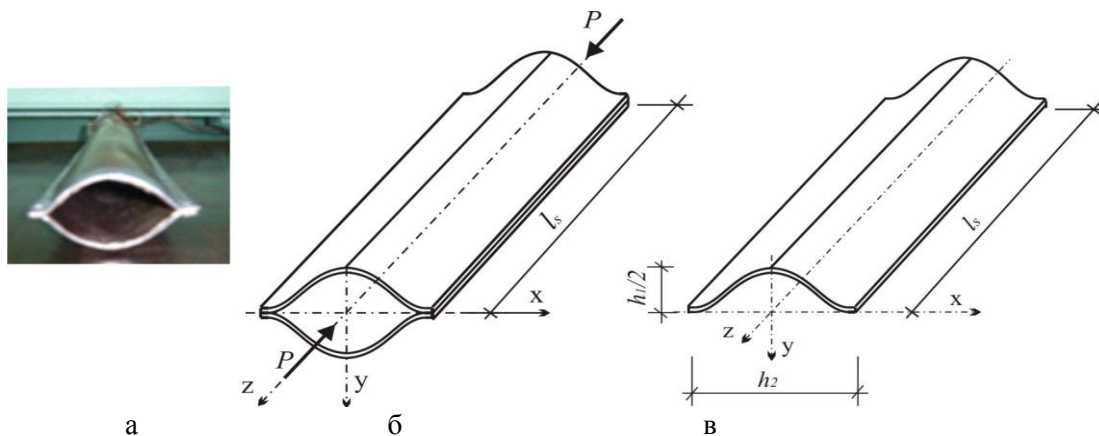


Рисунок 1 – К расчету полого элемента на устойчивость: а – фрагмент натурального полого элемента; б – закрытый полый элемент; в – открытый полый элемент [Calculation of the hollow element for stability: a is a fragment of a natural hollow element; b is closed hollow element; c – open hollow element].

Основные соотношения для составляющих нагрузок можно представить в виде [8]:

$$\left. \begin{aligned} EI_y \xi^{IV} + P \xi'' + M_x + a_y P \bar{\theta}'' &= 0, \\ EI_x \eta^{IV} + P \eta'' + M_y - a_x P \bar{\theta}'' &= 0, (a) \\ M_x + a_y P \bar{\xi}'' + M_y - a_x P \bar{\eta}'' + EI_y \theta^{IV} + \left(3P + 2\beta_x M_y - 2\beta_y M_x - GI_d \right) \bar{\theta}'' &= 0. \end{aligned} \right\}$$

где: E и G – модуль упругости и модуль сдвига рассматриваемого сечения;

I_x , I_y , I_d – геометрические характеристики поперечного сечения элемента; r – важная характеристика, устанавливающая форму сечения элемента.

Коэффициенты представленные уравнений зависят от не только от геометрических и упругих характеристик стержня, но также и от величины усилий – P , M_x и M_y , характеризующих при сжатии характер внешней нагрузки, а также величину и точку приложения ее в поперечном сечении полого элемента.

В работе [6] приведено решение уравнения (а), и представлены основные соотношения, необходимые для исследования тонкостенного элемента на устойчивость. Используя полученные зависимости, рассмотрим влияние размеров полого элемента на его устойчивость, а также как влияет материал конструкции на появляющиеся напряжения, в процессе потери устойчивости тонкостенного элемента.

ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА НА КРИТИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Пример 1. Найдем критические напряжения, возникающие в тонкостенном элементе при коэффициенте формообразования $k_p = 0,8 = \text{const}$ и различной марке (классе) стали: $R_y = 230$ (С235); 240 (С245); 250 (С255); 270 (С275); 280 (С285); 335 (С345) МПа. При этом условная ширина полос варьировалась в пределах: $\bar{h}_s = h_s / \ell_s = 0,01 \dots 0,1$; модуль упругости стали $E = 206000$ МПа. Критические напряжения определим по формуле:

$$\bar{\sigma}_{cr,x} = 0,5 \cdot \eta \cdot n_1 \cdot \beta_1 \left(\frac{h_s}{\ell_s} \right)^2 \frac{E}{R_y}.$$

где η , n_1 , β_1 – коэффициенты формы поперечного сечения полого элемента, которые принимались по номограмме [6] (рис. 2).

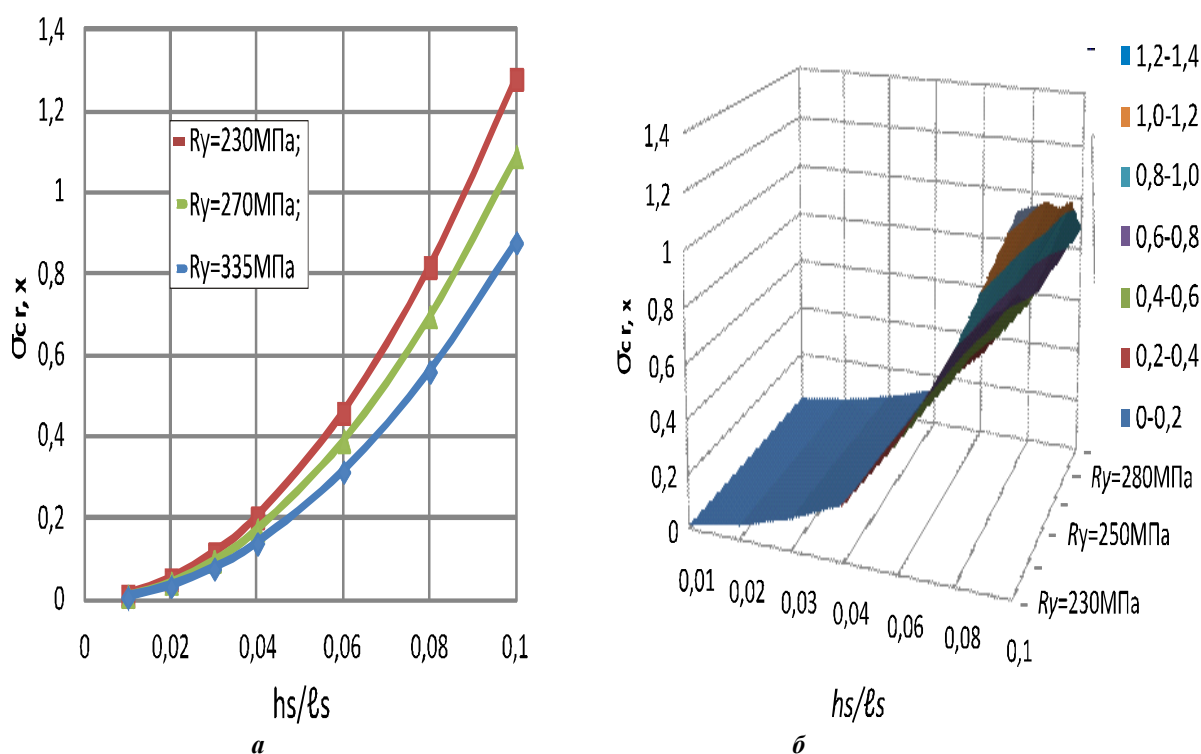


Рисунок 2 – Зависимость « $\bar{h}_s - \bar{\sigma}_{cr}$ » при различных значениях R_y : а – графическое представление;

б – представление данных в трехмерном виде [Dependence of « $\bar{h}_s - \bar{\sigma}_{cr}$ » for different values R_y ;

a is a graphical representation; b is data representation in three-dimensional form]

Анализ графиков (рис. 2) показал, что при увеличении расчетного сопротивления стали относительные критические напряжения снижаются. Причем, чем больше $\bar{h}_s = h_s / \ell_s$, тем большее расхождение кривых графика, что свидетельствует о влиянии материала на устойчивость тонкостенной конструкции полого элемента.

УСТАНОВЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ ПОЛОГО ЭЛЕМЕНТА НА КРИТИЧЕСКИЕ СИЛЫ ОБЩЕЙ ЕГО УСТОЙЧИВОСТИ

Пример 2. Требуется найти критические силы P_x и P_y при следующих исходных данных: длина полос $l_s = 3000$ мм; ширина полос $h_s = 300$ мм; толщина полос $t = 1,5$ мм; $R_y = 230$ МПа. Строим графики при одних и тех же размерах полос, но при разных размерах сформированного

полого элемента, с целью выяснения, как изменяются критические силы с увеличением высоты полого элемента и уменьшением его ширины h_2 (при постоянной ширине полос h_s). При этом моменты инерции поперечных сечений будут разные, значит и критические силы P_x и P_y будут разные.

Таким образом, изменяем коэффициенты формообразования и соответственно геометрические размеры полого элемента (h_1 и h_2) и находим критические силы. Расчет велся программе ВЕТА с соответствующим анализом данных в следующей последовательности:

- задаются коэффициентом раздутия k_p и находят n_1, n_2, b_1, b_2 ;
- определяют моменты инерции I_x и I_y :

$$I_x = n_1 \beta_1 t_s^3 h_s^3;$$

$$I_y = n_2 \beta_2 t_s^3 h_s^3;$$

- находят критические силы общей устойчивости полого элемента:

$$P_x = N_{cr,x} = k_1 k \pi^2 \frac{EI_x}{\ell_s^2},$$

$$P_y = N_{cr,y} = k_1 k \pi^2 \frac{EI_y}{\ell_s^2}.$$

Результаты расчетов представлены на рисунках 3 и 4:

где $\bar{P}_x = \frac{P_x}{R_y \cdot A}$; $\bar{P}_y = \frac{P_y}{R_x \cdot A}$; $\bar{h}_1 = \frac{h_1}{\ell_s}$; $\bar{h}_2 = \frac{h_2}{\ell_s}$.

Представленные данные в виде графиков (рис. 3) выявили следующую особенность:

- размеры полого элемента по его высоте ($\bar{h}_1$) увеличиваются до $\bar{P}_x=2$;
- размеры полого элемента по его ширине ($\bar{h}_2$) уменьшаются до $\bar{P}_y=2$,

Одна кривая является как бы продолжением другой. Но фактически идет сближение кривых в точке $\bar{P}=2$. В этой точке имеем практически круглое поперечное сечение полого элемента и этом случае имеем максимальные критические силы (рис. 3). То есть с увеличением раздутия (с увеличением высоты поперечного сечения полого элемента), критические силы увеличивались до $\bar{P}_x=2$ и уменьшались – до $\bar{P}_y=2$.

Полученные графики дают возможность для заданных размеров тонкостенного полого элемента, установить критические силы относительно осей x-x и y-y.

Изменение критических сил устойчивости относительно осей x-x и y-y в зависимости от коэффициентов формообразования представлено на рис.4, анализ которых показал следующее: усматривается изменение критических сил в зависимости от формы тонкостенного полого элемента, то есть от его размеров: высоты (h_1) и ширины (h_2);

четко просматривается влияние изменение формы поперечного сечения элемента на его устойчивость; причем:

- в сторону снижения критических сил относительно оси y-y при $k_p = 1-0,6$;
- в сторону увеличения относительно оси x-x при $k_p = 0 - 1$;

по представленным графикам (рис. 4) при любом коэффициенте формообразования (k_p) или сжатия (k_c) можно найти соответствующие критические силы сжатия.

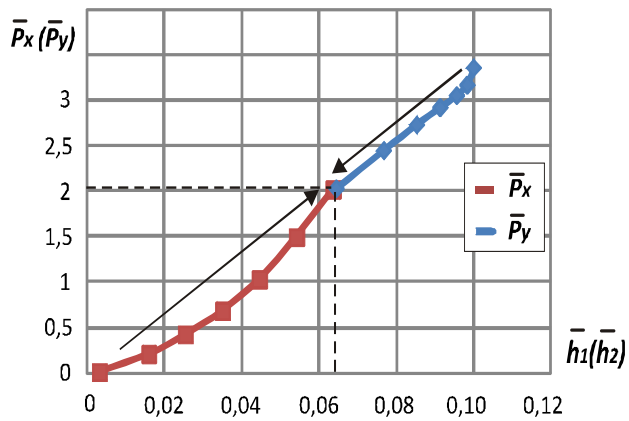


Рисунок 3 – Зависимость «размеры полого элемента – критические силы» [Dependence «dimensions of a hollow element – critical forces»]

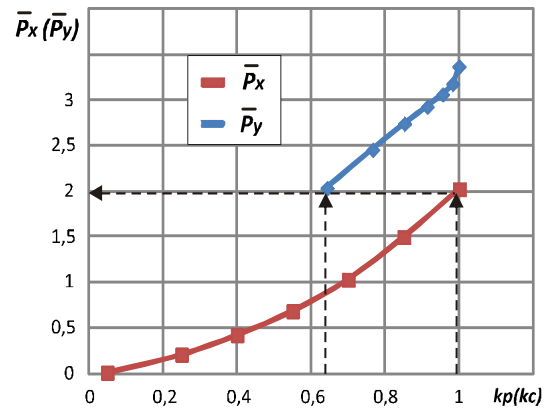


Рисунок 4 – Зависимость «коэффициенты формообразования k_p (k_c) – критические силы» [Dependence «shaping coefficients k_p (k_c) – critical forces»]

Представленный график очень удобный при анализе критических сил сжатия в зависимости от коэффициента раздутия (формообразования) тонкостенного полого стержневого элемента, имеющего в процессе создания его формы разные размеры. При этом установлена условная граница сближения критических сил устойчивости, к которой стремятся силы $\bar{P}_x$ (уменьшаясь), и силы $\bar{P}_y$ (увеличиваясь).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ СТЕРЖНЕВОГО ЭЛЕМЕНТА НА ЕГО УСТОЙЧИВОСТЬ ОТНОСИТЕЛЬНО ОСИ Х-Х

Пример 3. Требуется выполнить расчет на устойчивость моделей из стали при следующих исходных данных: длина моделей $l_s = 600\text{мм}$; ширина полос $h_s = 100\text{мм}$; толщина моделей $t_s = 0,27\text{мм}$. Расчет велся по программе БЕТА при коэффициентах формообразования $k_p = 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$.

По данным расчета построены графики зависимостей «коэффициенты формообразования k_p – силы сжатия $\bar{P}_x$ – высота поперечного сечения полого элемента $\bar{h}_1$ ». Здесь:

$$\bar{P}_x = \frac{P_x}{A \cdot R_u}; \quad \bar{h}_1 = \frac{h_1}{h_s}; \quad k_p = h_1 \pi / h_s.$$

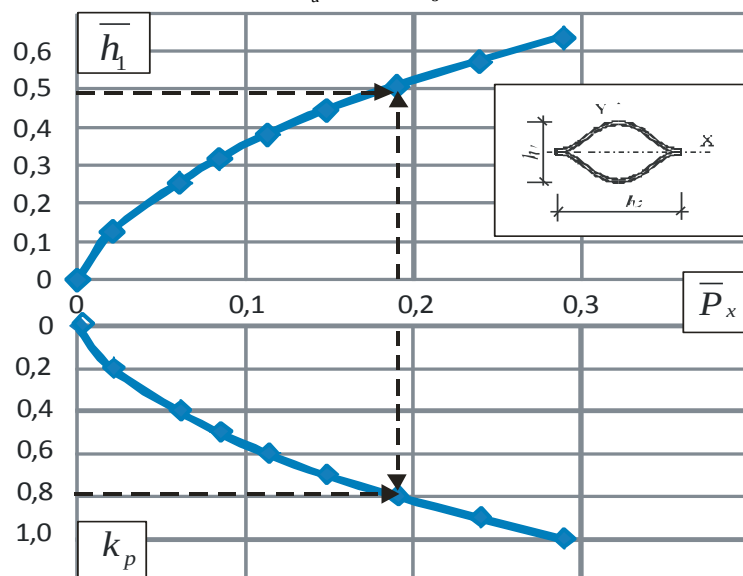


Рисунок 5 – Зависимость « k_p - $\bar{P}_x$ - $\bar{h}_1$ » [Dependence « k_p - $\bar{P}_x$ - $\bar{h}_1$ »]

Анализ графиков (рис. 5) показал:

- с увеличением высоты поперечного сечения стержневого элемента критические силы осевого сжатия увеличиваются;
- чем больше коэффициент формообразования, тем больше критические силы сжатия;
- характер кривых зависимости «высота сечения полого сечения – критические силы сжатия» и «коэффициент формообразования – критические силы сжатия» имеют четко выраженную параболическую зависимость.

Таким образом, по представленным зависимостям четко просматривается их двузначность – изменение критических сил в зависимости от двух параметров: коэффициента формообразования и размеров тонкостенного полого элемента. Это позволяет усматривать тесную взаимосвязь между важнейшими параметрами его поперечного сечения, вытекающую в закономерность изменения критических сил от двух взаимосвязанных величин при расчете конструкции на устойчивость.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КРИТИЧЕСКИХ СИЛ

Пример 4. Требуется провести экспериментальные исследования моделей из стали на потерю устойчивости; найти зависимость критических сил от высоты поперечного сечения полого элемента. Для этого было изготовлено шесть моделей из стали Ст3 с расчетным сопротивлением по временному сопротивлению $R_u=440\text{МПа}$. Модели типа Ст3-1...Ст3-6 с разными размерами поперечного сечения полого элемента (высотой h_1 и шириной h_2).

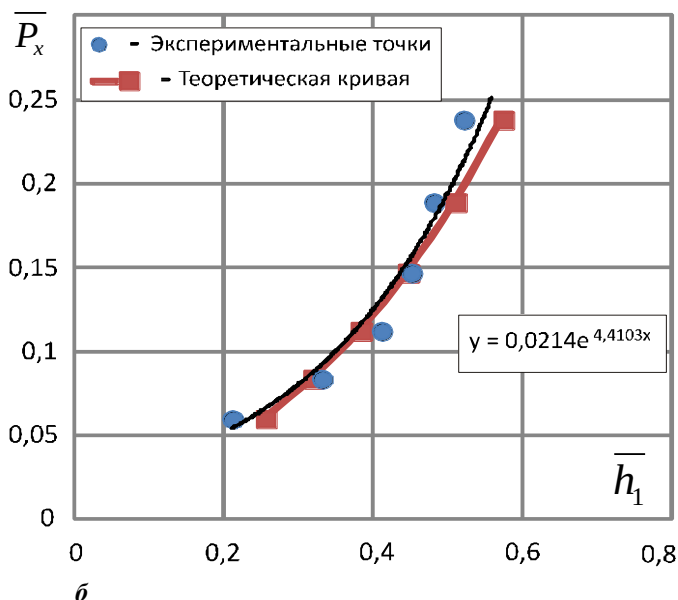
Размеры полос, из которых формировалась модели следующие: ширина полос $h_s=100\text{мм}$; толщина полос $t = 0,27\text{мм}$; длина полос $l_s = 700\text{мм}$; коэффициенты формообразования моделей изменялись в пределах $k_p = 0,4 \dots 0,9$.

После формирования моделей их концы обрезались на расстоянии 50мм. На рисунке 6 представлены результаты испытаний на сжатие 6 моделей, имеющих разную относительную высоту элемента полого поперечного сечения h_1 , при разных коэффициентах формообразования k_p (точки на графике). Здесь:

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1}{h_s}; \quad \bar{P}_x = \frac{P_x}{A \cdot R_u}.$$



а



б

Рисунок 6 – Исследование модели полого элемента: а – осевое сжатие модели в прессе;

б - зависимость « $\bar{h}_1$ – сила сжатия $\bar{P}_x$ » [Study of the hollow element model: a is axial compression of the model in the press; b is dependence « $\bar{h}_1$ – force of compression»]

Как видно из сравнительного анализа кривых (рис. 6), полученные экспериментальные данные показали вполне хорошую сходимость с результатами расчета; экспериментальные данные аппроксимируются достаточно простой зависимостью вида:

$$y = 0,02e^{4,4x},$$

где $x = \bar{h}_1$ – высота поперечного сечения полого элемента; $y = \bar{P}_x$ – сила сжатия.

Таким образом, в теоретическом изложении принятая методика в работе [6] имеет хорошую применимость для расчета полых стержневых тонкостенных элементов на устойчивость.

ВЫВОДЫ

Разработанная инновационная технология [4, 5] охватывает достаточно широкий круг сооружений из легких металлических конструкций, созданных из полых элементов, включая объекты энергетики. На основе проведенных автором исследований и анализа устойчивости полого элемента при центральном сжатии, получено следующее:

- выявлено, что изменение критических сил находится зависимости от различных параметров стержневого тонкостенного элемента полого поперечного сечения; при этом, с увеличением высоты поперечного сечения элемента критические силы осевого сжатия увеличиваются;
- установлено, что зависимости «высота поперечного сечения полого сечения – критические силы сжатия» и «коэффициент формообразования – критические силы сжатия» имеют четко выраженную параболическую зависимость;
- выявлено, что чем больше коэффициент формообразования, тем больше критические силы сжатия;
- установлено, что материал стержневого элемента полого поперечного сечения оказывает влияние на критические напряжения;
- показано, что расчеты устойчивости полого элемента хорошо согласуется с данными экспериментов на моделях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергосбережение на атомном уровне [Электронный ресурс] / URL: <https://www.eprussia.ru/epr/233/15501.htm> (дата обращения: 28.12.2018).
2. Распоряжение Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. N1715-р. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года [Электронный ресурс] / URL: <http://norm-load.ru/SNiP/Data1/57/57547/index.htm/> (дата обращения: 20.12.2018).
3. Энергосберегающие технологии, энергосбережение [Электронный ресурс] / URL: <http://www.saveplanet.su/#teh> (дата обращения 28.12.2018).
4. Ращепкина, С.А. Формообразование инновационных металлических конструкций различного назначения [Текст] / С.А. Ращепкина // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. – № 11. – С. 74-76.
5. Ращепкина, С.А. Новые пространственные ребристые металлические конструкции зданий и сооружений [Текст] / С.А. Ращепкина // Промышленное и гражданское строительство. – 2009. – № 7. – С. 48-50.
6. Ращепкина, С.А. К вопросу об устойчивости металлической цилиндрической оболочки из сборных элементов [Текст] / С.А. Ращепкина // Глобальная ядерная безопасность. Москва-Волгодонск: ВИТИ НИЯУ «МИФИ». – 2016. – № 1 (18). – С. 51-59.
7. Rashchepkina, S.A. Calculation of horizontal pressure of backfill on a round wall [Text] / S.A. Rashchepkina // Power Technology and Engineering. – New York : Springer New York Consultants Bureau, 2018.
8. Власов, В.З. Тонкостенные упругие стержни. Принципы построения технической теории оболочек. Избранные труды. Т. 3. [Текст] / В.З. Власов – Москва : изд-во АН СССР, 1963. – 507 с.
9. Гу, Ц. Деформации внешнего магнитного поля при дуговой сварке магнитных металлов [Текст] / Ц. Гу, А.М. Рыбачук // Москва-Волгодонск : ВИТИ НИЯУ «МИФИ». – 2017. – № 4 (25). – С. 70-77.

10. Николаев, Г.А. Сварные конструкции. Технология изготовления. Автоматизация производства и проектирование сварных конструкций [Текст] / Г.А. Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров – Москва : Высшая школа, 1983. – 344 с.

REFERENCES

- [1] E`nergoberezhenie na atomnom urovne [Energy Saving Technologies]. URL: <http://www.saveplanet.su/#teh> (in Russian).
- [2] Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 13noyabrya 2009g. N1715-r. E`nergeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 goda [Order of the Government of the Russian Federation of November 13, 2009. N1715-p. Energy Strategy of Russia for the period up to 2030]. URL: <http://norm-load.ru/SNiP/Data1/57/57547/index.htm> (in Russian).
- [3] E`nergoberegayushhie tehnologii, e`nergoberezhenie [Energy Saving Technologies, Energy Saving]. URL: <http://www.saveplanet.su/#teh> (in Russian).
- [4] Rashchepkina S.A. Formoobrazovanie innovacionny`x metallicheskih konstrukcij razlichnogo naznacheniya [The Formation of Innovative Metal Structures for Various Purposes]. Promy`shlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Construction]. 2012. P. 74-76. ISSN 0869-7019 (in Russian).
- [5] Rashchepkina S.A. Novy`e prostranstvenny`e rebristy`e metallicheskie konstrukcii zdaniy i sooruzhenij [New Spatial Ribbed Metal Structures of Buildings and Structures] Industrial and Civil Engineering. 2009. №7. ISSN 0869-7019. P. 48-50 (in Russian).
- [6] Rashchepkina S.A. K voprosu ob ustojchivosti metallicheskoj cilindricheskoj obolochki iz sborny`x e`lementov [Stability of Steel Cylindrical Shell of Prefabricated Elements] Global Nuclear Security. Moscow-Volgodonsk : VETI NRNU «MEPhI». 2016. № 1 (18). ISSN 2305-414X. P. 51-59 (in Russian).
- [7] Rashchepkina S.A. Calculation of Horizontal Pressure of Backfill on Round Wall. Power Technology and Engineering. Springer New York Consultants Bureau. 2018. ISSN: 1570-145X/ISSN: 1570-1468 (in English).
- [8] Vlasov V.Z. Tonkostennyye uprugie sterzhni. Printsipy postroeniya tekhnicheskoy teorii obolochek [Thin-Walled Elastic Rods. Principles of the Technical Theory of Shells]. Izbrannyye trudy [Selected Works]. Vol. 3. Moscow : Pub. Izdatel'stvo AN SSSR [USSR Academy of Sciences Publishing House]. 1963. 507 p. (in Russian).
- [9] Gu C., Rybachuk A.M. Deformacii vneshnego magnitnogo polya pri dugovoy svarke magnitny`x metallov [Deformation of the External Magnetic Field in Arc Welding Magnetic Metals]. Moscow-Volgodonsk : VETI NRNU "MEPhI". 2017. №4 (25). ISSN 2305-414X. P. 70-77 (in Russian).
- [10] Nikolaev G.A., Kurkin S.A., Vinokurov V.A. Welded structures. Manufacturing technology. Automation of production and design of welded structures. Moscow: Higher school. 1983. 344 p. (in Russian).

Influence of Various Parameters on the Hollow Element Stability

S.A. Rashchepkina

*The Balakovo engineering and technological Institute – branch of the
National research nuclear University «MEPhI», 140 Chapayeva St., Balakovo, Saratov region, Russia, 413800
ORCID ID: 0000-0003-1136-4689
e-mail: SARashchepkina@mephi.ru*

Abstract – The work studied core elements of the hollow cross-section created by a promising technology that does not require large energy costs. The change in the critical forces depending on its transverse dimensions is revealed based on the numerical analysis of the hollow element stability under central compression. It is found that the material of the rod element influences the critical stresses. The paper shows that the calculations of the hollow element stability are coherent with the experimental data on models.

Keywords: nuclear power plant, metal, hollow element, calculation, stability, experiment.

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

УДК: 621.791.75.053

**СТАТИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСИЕ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ ПРИ
СВАРКЕ СТЫКОВЫХ ШВОВ С ПОЛНЫМ ПРОПЛАВЛЕНИЕМ**

© 2019 А.М. Рыбачук*, В.Ф. Кубарев**, Ю.В. Доронин***

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

***ООО «Аттестационный Центр Городского Хозяйства» (АЦГХ), Москва, Россия

В статье рассматривается влияние сил поверхностного натяжения при односторонней дуговой сварке стыковых соединений на весу и с использованием дополнительных магнитных полей и подкладных устройств. Аналитически показана возможность удержания и формирования жидкого металла сварочной ванны при толщине свариваемых деталей от 10 мм и выше.

Ключевые слова: сварочная ванна, поверхностное натяжение жидкой стали, давление дуги.

Поступила в редакцию 27.02.2019

После доработки 20.05.2019

Принята к публикации 24.05.2019

Поверхностные явления при сварке играют важную роль в процессах формирования шва. Они определяют геометрическую форму шва, угол перехода от основного металла к шву. Особенно это влияние характерно для односторонней сварки. При сварке на весу с полным проплавлением, на вертикальной, наклонной плоскости и в потолочном положении, силы поверхностного натяжения удерживают жидкий металл сварочной ванны. Важным аспектом при односторонней сварке является формирование корня шва без усиления в виде обратного валика, который при сборке ряда конструкций в химическом, энергетическом и атомном машиностроении необходимо удалять, что приводит к значительным трудозатратам. В этой связи рассмотрение некоторых физико-механических моделей формирования шва по-прежнему актуально.

Рассмотрим равновесие сварочной ванны при односторонней сварке на весу, т.е. при сварке без применения устройств или способов, удерживающих жидкий металл.

В этом случае нижняя поверхность сварочной ванны контактирует с газом или с расплавленным шлаком, а верхняя – с дугой. Часто при сварке образуется проплав с цилиндрической формой поверхности, когда кривизной поверхностей сварочной ванны в продольном направлении (в направлении сварки) можно пренебречь.

Разберем пример, к которому относятся также сварка корневых швов толстых (выше 10 мм) листов с разделкой кромок. При такой схеме проплава расплавленный металл, расположенный между двумя вертикальными стенками, может удерживаться силами поверхностного натяжения так же, как и при капиллярном поднятии смачивающей жидкости. Поверхность жидкости в непосредственной близости от твердой стенки искривляется. При смачивании стенки жидкостью кривизна направлена вогнутостью вверх, не смачивании – вниз. В случае сближения стенок на определенное расстояние обе кривизны сомкнутся и составят общую кривизну поверхности

жидкости. На таком расстоянии проявляется капиллярный эффект. Для воды и ртути капиллярный размер составляет 2 мм.

Оценим размеры между твердыми стенками, которые могут считаться капиллярными для жидкой стали [1, 2]. Капиллярный размер может служить ориентиром для предельной ширины проплавления при сварке на весу. Размеры, которые могут считаться капиллярными, зависят от поверхностного натяжения и плотности жидкости. Чем выше поверхностное натяжение и меньше удельный вес жидкости, тем большие диаметры трубок и расстояния между вертикальными пластинами будут считаться капиллярными.

Коэффициент поверхностного натяжения ртути равен 490 мН/м, а ее плотность составляет 13,6 г/см³, а коэффициент поверхностного натяжения хромоникелевой стали в условиях сварки составляет 1450 мН/м. [1]. Произведение отношений указанных значений показывает, во сколько раз может быть увеличен капиллярный размер для жидкой стали по сравнению с ртутью:

$$\frac{1450}{490} \times \frac{13,6}{7} = 5,7.$$

Следовательно, способность к капиллярным явлениям у жидкой стали выше, чем у ртути в 5,7 раза. Если для ртути размер 2 мм считается капиллярным, то для жидкой стали этот размер может быть увеличен до 11,4 мм. Приблизительно, такой же капиллярный размер и для обычных низкоуглеродистых сталей. При этом подъем сравниваемых жидкостей достигает одной высоты при условии подбора пластин, одинаково смачиваемых указанными жидкими металлами. Из этого следует, что при ширине проплава, не превышающем 11,4 мм, сварочная ванна может удерживаться силами поверхностного натяжения. При сварке корневых швов проплавление осуществляется, как правило, на значительно меньшую ширину, как и при односторонней сварке стыковых швов с полным проплавлением определенных толщин.

Жидкий металл сварочной ванны находится под действием (рис. 1) следующих сил:

F_T – сила тяжести металла сварочной ванны;

$F_{пв}$ – равнодействующей сил поверхностного натяжения, обусловленного кривизной верхней поверхности сварочной ванны;

$F_{пн}$ – равнодействующей сил поверхностного натяжения, обусловленной кривизной нижней поверхности сварочной ванны;

F_d – силы давления дуги;

$F_{эм}$ – собственных электромагнитных сил в жидком металле, вызванных взаимодействием сварочного тока с собственным магнитным полем;

Равновесие сварочной ванны определяется следующим равенством:

$$F_T + F_d + F_{эм} = F_{пв} + F_{пн}$$

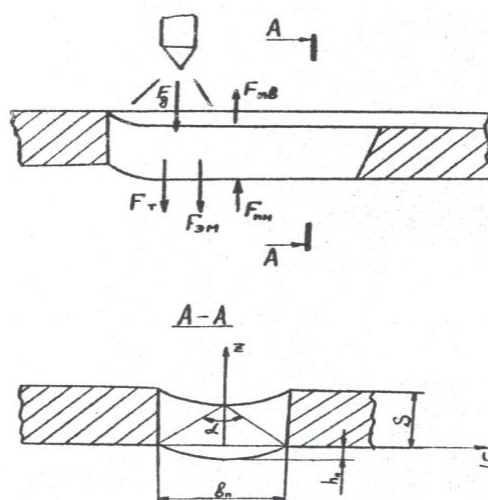


Рисунок 1 – Равновесие сварочной ванны [Equilibrium of the weld pool]

Нарушение сплошности сварочной ванны наблюдается под дугой в головной части сварочной ванны или в хвостовой части сварочной ванны (рис. 1). Образование отверстия под дугой не всегда приводит к прожогу, т.е., вытеканию. Жидкого металла и прекращению формирования шва. Например, при сварке плазменной дугой сохраняется сварочная ванна и формируется шов независимо от наличия отверстия под дугой. Но если нарушается равновесие сварочной ванны в хвостовой части, жидкий металл вытекает, и шов не формируется, т.е. получается прожог.

Рассмотрим равновесие слоя жидкого металла единичной длины в хвостовой части сварочной ванны (в сечении А-А). Равновесие определяется следующим равенством:

$$F_T + F_{ЭМ} = F_{пв} + F_{пн}$$

Вес слоя единичной длины

$F_T = \rho g b_n S$, где ρ – плотность жидкого металла; g – ускорение силы тяжести; S – толщина свариваемых листов; b_n – ширина сварочной ванны;

Электромагнитная сила

$F_{ЭМ} = \rho g_{ЭМ} b_n S$; где $g_{ЭМ}$ – ускорение электромагнитной силы;

Силу поверхностного натяжения на нижней поверхности сварочной ванны найдем, используя уравнение Лапласа, в соответствии с которым [2], разность давлений снаружи и внутри жидкости

$$P = \frac{\sigma_n}{R} \text{ где } \sigma_n \text{ – поверхностное натяжение на нижней стороне сварочной ванны;}$$

R – радиус нижней поверхности сварочной ванны;

Силу, удерживающую жидкий металл, определим интегрированием по поверхности цилиндра (рис. 1):

$$F_{пн} = 2 \int_0^{\alpha/2} \rho ds \cos \alpha = 2 \int_0^{b_n/2} \rho dy = \rho b_n = \frac{\sigma_n}{R} b_n; \text{ здесь } ds \text{ – элементарная площадка на}$$

поверхности сварочной ванны.

Аналогично определяется сила поверхностного натяжения на верхней поверхности сварочной ванны.

$$F_{пв} = \frac{\sigma_v}{R} b_n, \text{ где } \sigma_v \text{ – поверхностное натяжение на верхней поверхности сварочной}$$

ванны.

Найденные силы подставим в уравнение (1):

$$\rho g b_n S + \rho g_{эм} b_n S = \frac{\sigma_n b_n}{R} + \frac{\sigma_г}{R} b_n, \quad (1)$$

или в уравнение (2):

$$\rho S(g + g_{эм}) = \frac{\sigma_n + \sigma_г}{R}. \quad (2)$$

Примем за предельный случай равновесия такую высоту провисания сварочной ванны, при которой поверхности сварочной ванны примут формы полуцилиндров. Тогда $R = b_n/2$, и уравнение (2) примет вид:

$$\rho S(g + g_{эм}) = \frac{2(\sigma_г + \sigma_n)}{b_n}.$$

Из этого выражения найдем предельную толщину листов, которую можно сварить за один проход при цилиндрической форме проплава, формула (3):

$$S_{пр} = \frac{2(\sigma_г + \sigma_n)}{\rho(g + g_{эм})b_n}. \quad (3)$$

При этом ширина проплава может изменяться от нуля до капиллярного размера, соответствующего данному свариваемому материалу. Из формулы (3) видно, что предельная толщина листов свариваемых на весу, зависит от поверхностного натяжения на поверхностях сварочной ванны, ширины проплава и ускорения электромагнитных сил в сварочной ванне.

Вообще, геометрия сварочной ванны зависит от многих факторов, но в основном, считается, что она зависит в значительной степени от гидродинамической обстановки в сварочной ванне. Экспериментальные исследования поведения сварочной ванны были в основном сосредоточены на характеристиках потока, но были довольно ограниченны (сварочные ванны обычно имеют порядок миллиметров, а также высокие температуры процесса сварки), что делало измерения потока практически невозможным.

Исследователи из Новой Зеландии предложили модель для описания и отражения потока в расплавленной ванне с учетом конвекции Марангони [3]. Модель показала, что скорость перемещения металла в передней части ванны немного меньше, чем задней. Эффект Марангони усилил конвекцию и теплообмен. Впервые теоретически было показано, что основной причиной обратной конвекции Марангони является явление, называемое «поверхностный фазовый переход», приводящее к образованию нанотонкого слоя FeO на поверхности жидкого металла.

Что касается применений к сварке, чем больше градиент температуры поверхностного натяжения, тем больше значение имеет dy/dT , которое может варьироваться от отрицательного до положительного. Решающее значение для геометрии сварочной ванны будет иметь изменение знака (само значение этого градиента будет иметь малый порядок, 10^{-4}).

Гидродинамические процессы в сварочной ванне во многом зависят от наличия поверхностно-активных элементов в жидком металле, что и определило представленную математическую модель, где присутствует активность «а».

$$\frac{d\gamma}{dT} = \frac{d\gamma}{dT}\bigg|_0 - R\Gamma_S \ln(1 + Ka_i) - \frac{Ka_i}{(1 + Ka_i)} \frac{\Gamma_S(\Delta H^0 - \Delta \bar{H}_i^M)}{T}$$

$$K = k_1 \exp\left[\frac{-\Delta H^0}{RT}\right]$$

где $d\gamma/dT|_0$ – градиент температуры поверхностного натяжения для чистого металла;

$H/(м^*К)$; R – газовая постоянная, Дж/(моль * К);

Γ_S – избыток поверхности кмоль/м²;

ΔH^0 – стандартная энтальпия образования, Дж/кмоль;

ΔH_i^M – частичная молярная энтальпия смешения частиц в растворе, Дж/кмоль;

k_1 – постоянная энтропии сегрегации;

a_i – активность элемента в материале.

Данная математическая модель дает исследователям сварки некоторые способы влияния поверхностных активных элементов на воздействие силы поверхностного натяжения, следовательно, на поток жидкости в сварочной ванне и, в конечном счете, на геометрию ванны. Основной недостаток этого приближения – это определение градиента температуры поверхностного натяжения для одного активного элемента за раз [3]. Конвекция Марангони, как один из важных факторов образования поверхностных дефектов при сварке плавящимся электродом в защитных газах рассмотрена в работе [4].

В исследованиях специалистов из США, сварочная ванна при сварке вольфрамовым электродом рассматривается как объект получения информации о глубине проплавления в зависимости от всех силовых факторов, влияющих на перемещение металла из головной в хвостовую часть [5]. В своей работе А.Д. Размышляев представил оригинальную объемную модель сварочной ванны, где металл при сварке плавящимся электродом перемещается в осевом направлении по сопрягаемым криволинейным струйкам (рис. 2) [6].

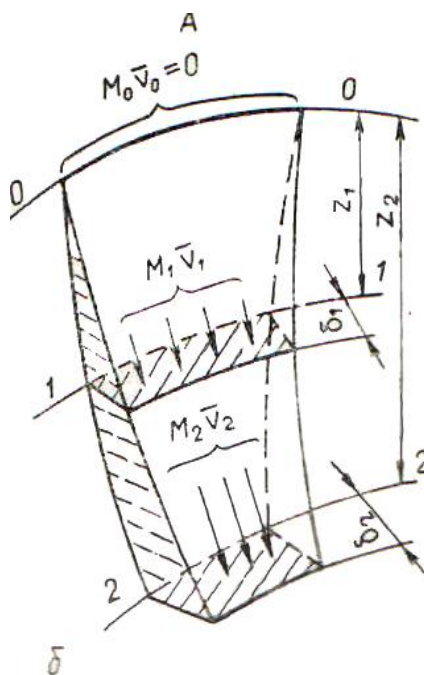


Рисунок 2 – Схема сил действующих на криволинейную струю [Diagram of forces acting on a curved jet]

Гидродинамическая задача для сварочной ванны была решена в одномерном приближении и в статье [7], где представлена система дифференциальных уравнений для расчета скорости перемещения металла в сварочной ванне. В случаях, когда сварочная ванна удерживается подкладными устройствами (подушки флюсовые, подкладки флюсомедные, керамические, стекольные, стекловолоконные) обстановка и процесс перемещения металла сварочной ванны иной. Ряд работ по влиянию гидродинамических параметров в сварочной ванне на формирование корня при сварке плавящимся электродом было выполнено и опубликовано в монографии Ю.В. Доронина (рис. 3) [8].

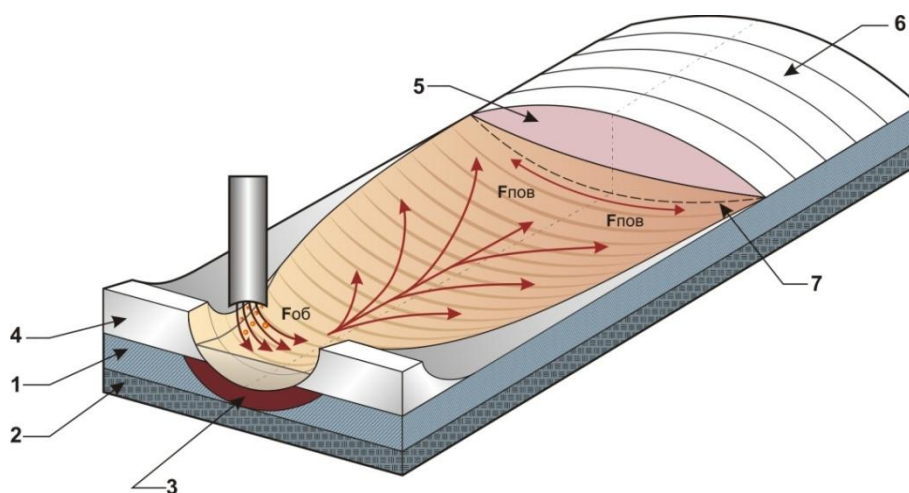


Рисунок 3 – Модель образования обратного валика при односторонней сварке на подкладке: 1 – формирующий слой; 2 – тугоплавкий слой; 3 – шлаковая ванна; 4 – основной металл; 5 – хвостовая часть ванны; 6 – шов; 7 – граница формы обратного валика; $F_{пов}$ – силы межфазного натяжения на границе шлак-металл; $F_{об}$ – равнодействующая всех сил, действующих со стороны дуги и способствующих перемещению металла [Model of the formation of the return roller with one-sided welding on the lining: 1 – forming layer; 2 – refractory layer; 3 – slag bath; 4 – base metal; 5 – the tail portion of bath; 6 – the seam; 7 – reverse roller form border; $F_{пов}$ – interfacial tension forces at the slag-metal interface; $F_{об}$ – resultant of all forces acting from the side of the arc and promoting the movement of the metal]

При односторонней сварке плавящимся электродом на различного рода формирующих устройствах, сварочная ванна претерпевает влияние физико-химических факторов на границе в расплаве металл-шлак. Изменяется форма корневой части сварочной ванны под воздействием процессов, происходящих на границе пограничного слоя жидкий металл – жидкий шлак.

Современные технологии односторонней сварки под флюсом и порошковой проволокой, представленные японскими исследователями, используют флюсомедные и медные подкладки, позволяющие сваривать за один проход стыковые соединения толщиной до 16 мм на скорости 1,5 м/мин. При сварке порошковой проволокой используется тандем в две сварочные ванны [9, 10]. В исследованиях были проведены расчеты скоростей жидкого металла в корневой части сварочной ванны, сопоставимые со скоростью сварки.

Тем не менее, наиболее законченным с точки зрения конечного результата, применительно к односторонней дуговой сварке неплавящимся электродом, является комплекс исследований, выполненных в МГТУ им. Н.Э. Баумана [11], включающих разработку математической и гидродинамической модели, создание оборудования и технологии сварки стыковых соединений сталей толщиной от 2 до 6 мм с использованием квадрупольного магнитного поля.

Выводы:

1. Регулировка ширины провара сварочной ванны при односторонней сварке стыковых соединений на весу способна обеспечить формирование корня шва при толщине свариваемых деталей до 10 мм и более, без дополнительных формирующих устройств и технологических процессов.
2. Поверхностное натяжение верхней и нижней части сварочной ванны эффективно уравнивает силы тяжести сварочной ванны, силы давления дуги и собственные электромагнитные силы, возникающие от взаимодействия сварочного тока с собственным магнитным полем.
3. При сварке плавящимся электродом провар и форма обратного валика зависит от гидродинамических процессов в корне сварочной ванны и от физико-химических свойств расплава формирующей подкладки.
4. Управление формой шва при односторонней сварке на весу наиболее качественно осуществляется при использовании квадрупольного магнитного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тюльков, М.Д. Роль сил поверхностного натяжения в формировании корня стыковых швов [Текст] / М.Д. Тюльков. – Ленинград, 1957. – Труды ЛПИ им. М.И. Калинина. – № 189. – С. 34-41.
2. Berezovskii, B.M. Optimisation of weld formation in arc welding with continuous penetration without backing Welding International 1989. No 4. P. 345-348.
3. Wang, S. Nates, R. .Pasang, T., Ramesani, M. Modelling of gas Tungsten Arc Welding Pool under Marangoni Convection. Universal Journal of Mechanical Engineering. 2015. 3 (5). С. 185-201.
4. Hu, J., Guo, H. Tsai, H.L. Weld pool dynamics and the formation of ripples in 3D gas metal arc welding. International Journal of Heat and Mass Transver 51 (2008) 2537-2552.
5. Huang, J.K. Yang, M.H. Chen, J.S. Yang, F.Q. Zhang, Y.M. Fan, D.. The oscillation of stationary weld pool surface in the GTA welding. Journal of Material Processing Tech. 256 (2018 57-68).
6. Размышляев, А.Д. Гидродинамические параметры пленки жидкого металла на передней стенке кратера ванны при дуговой сварке [Текст] / А.Д. Размышляев // Автоматическая сварка. – 1982. – № 1. – С. 20-25.
7. Кубарев, В.Ф. Гидродинамические процессы в сварочной ванне [Текст] / В.Ф. Кубарев, Г.Г. Чернышов // Известия вузов. Машиностроение. – 1979. – № 5. – С. 119-123.
8. Доронин, Ю.В. Односторонняя дуговая сварка сталей [Текст] / Ю.В. Доронин // НИЯУ МИФИ. 2017. – 135 с.
9. Kimoto, I., Notomasu, R.. CO2-gas-shielded one-side welding process two electrodes. Nippon Steel Technical Report № 95. January 2007. P. 11-17.
10. Yamana, S . Ishikava, T. Nakajma, T. Torch welding and feed-forward control of back bead in one-side backing less. V-groove welding by using back welding. Quarterly Journal of the Japan Welding society Vol.25. (2007). № 1. P. 159-164.
11. Гу, Ц. Деформация внешнего магнитного поля при дуговой сварке магнитных металлов [Текст] / Ц. Гу, А.М. Рыбачук // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 4. – С. 70-77.

REFERENCES

- [1] Tyul`kov M.D. Rol` sil poverxnostnogo natyazheniya v formirovanii kornya sty`kovy`x shvov [The Role of Surface Tension Forces in the Formation of the Root of Butt Joints]. Leningrad. 1958. Trudy` LPI im. M.I. Kalinina [Leningrad 1957. Proceedings of Kalinin LPI.]. № 189. P. 34-41 (in Russian).
- [2] Berezovskii B.M. Optimisation of weld formation in arc welding with continuous penetration without backing Welding International 1989/ №4/P. 345-348 (in English).
- [3] Wang S., Nates R., Pasang T., Ramesani M. Modelling of Gas Tungsten Arc Welding Pool under Marangoni Convection. Universal Journal of Mechanical Engineering. 2015. № 3 (5). P. 185-201.
- [4] Hu J., Guo H., Tsai H.L. Weld Pool Dynamics and the Formation of Ripples in 3D Gas Metal Arc Welding. International Journal of Heat and Mass Transver 51. 2008. P. 2537-2552 (in English).
- [5] Huang J.K., Yang M.H., Chen J.S., Yang F.Q., Zhang Y.M., Fan D. The Oscillation of Stationary Weld Pool Surface in the GTA Welding. Journal of Material Processing Tech. 256. 2018. P. 57-68 (in English).

- [6] Razmyshlyayev A.D. Gidrodinamicheskie parametry` plenki zhidkogo metalla na perednej stenke kratera vanny` pri dugovoj svarke. Avtomaticheskaya svarka [Hydrodynamic Parameters of the Liquid Metal Film on the Front Wall of the Bath Crater during Arc Welding. Automatic Welding]. 1982. №1. P. 20-25 (in Russian).
- [7] Kubarev V. F., Chernyshov G. G. Gidrodinamicheskie processy` v svarochnoj vanne [Hydrodynamic Processes in the Welding Bath –Proceedings of Universities. Engineering]. 1979. №5. P. 119-123 (in Russian).
- [8] Doronin Yu. V. Odnostoronnyaya dugovaya svarka stalej [One-Side Arc Welding of Steels]. NRNU MEPhI. 2017. 135 p. (in English).
- [9] Kimoto I., Notomasu R. CO2-gas-shielded one-side welding process two electrodes. Nippon Steel Technical Report. № 95. January. 2007. P. 11-17 (in English).
- [10] S Yamana, T. Ishikawa, T Nakajima Torch welding and feed-forward control of back bead in one-side backing less.V-groove welding by using back welding. Quarterly Journal of the Japan Welding society Vol.25. 2007. №1. P. 159-164 (in English).
- [11] GU C., Rybachuk A.M. Deformaciya vneshnego magnitnogo polya pri dugovoj svarke magnitny`x metallov [Deformation of the External Magnetic Field in Arc Welding Magnetic Metal]. Global`naya yadernaya bezopasnost` [Global Nuclear Safety]. 2017. № 4. P.7 (in Russian).

Weld Pool Static Equilibrium in Butt Welds with Full Penetration

A.M. Rybachuk^{*1}, V.F. Cubarew^{2}, Yu.V. Doronin^{***3}**

**Bauman Moscow State Technical University, Build 1, Vtoraja Baumanskaya St., 5, Moscow, Russia 105005*

¹ORCID iD: 0000-0002-9078-2653

Wos Researcher ID: O-6229-2017

e-mail: amrybachuk@mail.ru

***National Research University «MPEI», Krasnokazarmennaya St., 14, Moscow, Russia 111250*

²ORCID iD: 0000-0001-8493-8933

WoS Researcher ID: J-5424-2017

e-mail: kubarevfv@mail.ru

****LTD «Certification Center of municipal services»,
Office 36, Tkatskaya St., 46, Moscow, Russia 105187*

³ORCID iD: 0000-0002-3294-882X

WoS Researcher ID: O-6190-2017

e-mail: doronin-45@mail.ru

Abstract – The article deals with the influence of surface tension forces in one-sided arc welding of butt joints on weight. It shows analytically the possibility of holding the liquid metal of the weld pool when the thickness of the welded parts is from 10mm. and above.

Keywords: weld pool, pressure of the arc, surface tension liquid steel.

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

УДК 621.7(072)

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ
ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ АТОМНОГО
МАШИНОСТРОЕНИЯ**

© 2019 В.Т. Саункин*, В.В. Кривин*, Н.Г. Григорьев**, О.Е. Драка*

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

***Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, Ростовская обл., Россия*

В работе рассматривается проблема повышения точности обработки изделий атомного машиностроения. Проведенные расчеты показали, что основной (весомой) составляющей погрешности обработки является динамическая погрешность, то есть в условия работы системы. Экспериментальные исследования подтвердили этот вывод и показали, что основным фактором является температурная деформация изделия в процессе обработки. Влияние указанного фактора можно минимизировать, изменяя параметры режимов обработки. Для этого можно использовать полученные экспериментальные зависимости.

Ключевые слова: изделия атомного энергетического машиностроения, размерная точность изделия, температурная деформация изделия, в процессе его обработки, технологический режим обработки изделия.

Поступила в редакцию 21.02.2019

После доработки 15.03.2019

Принята к публикации 22.03.2019

В атомном машиностроении предъявляются высокие требования к качеству изготовления деталей. Это связано, как правило, с последующей качественной сборкой изделия, что, в конечном счете, определяет его качественную работу в жестких условиях эксплуатации. Особые требования предъявляются к качеству изготовления парных деталей (например, вал – втулка), которые обрабатываются с требуемым зазором (натягом). Это важно, как правило, они работают в условиях повышенных температур и к деталям предъявляются жесткие требования по допускам на зазор или натяг.

Однако при обработке точных деталей возникает много трудностей. Одна из них износ режущей кромки инструмента в процессе обработки деталей (особенно крупногабаритных) [1].

Используемое для обработки оборудование относится к электромеханическим, в которых большое значение имеет инерционность движущихся и вращательных частей. Инерционность и упругие деформации системы могут быть причинами нарушения устойчивости работы системы и негативно сказываться на точности обработки.

В атомном машиностроительном производстве детали машин изготавливают с высокой размерной точностью. Высокая точность геометрических размеров и формы деталей обеспечивают правильное функционирование, надежность и долговечность работы механизмов и машин. Точность размеров деталей определяет возможность их правильной сборки и взаимозаменяемости, позволяющей существенно снизить затраты

при изготовлении, ремонте и эксплуатации механизмов и машин.

Для обеспечения высокой точности на финишных операциях станки снабжают средствами контроля размеров обрабатываемых деталей. К таким видам обработки относится, например, внутреннее шлифование, круглое наружное врезное шлифование, плоское шлифование с многократным проходом шлифовального круга по обрабатываемой поверхности, врезное точение и т.п. [2].

Погрешности обработки зависят как от собственных погрешностей измерительного устройства, так и от погрешностей станка (наличия зазоров, инерционности узлов, вибраций при работе), приспособления, износа инструмента, выбранных режимов обработки и других технологических особенностей [3].

Баланс точности системы должен производиться на основе составляющих этой суммарной погрешности. Отдельно должны быть определены собственные погрешности средства контроля статических и динамических условиях, а также составляющие суммарной погрешности, вносимыми различными технологическими факторами.

Необходимо иметь в виду, что погрешности геометрической формы деталей, вызванные несовершенством отдельных узлов станка, не компенсируются средствами контроля [4]. Поэтому применение даже самых точных средств контроля не гарантирует получение высокой размерной точности деталей, если какой-либо из элементов технологической системы не отвечает определенным требованиям [5].

Суммарная погрешность обработки включает систематическую и случайную составляющие. Случайная составляющая при автоматизированном производстве с использованием средств контроля, составляет большую часть суммарной погрешности.

Поэтому будем рассматривать лишь случайную составляющую суммарной погрешности обработки, которая характеризуется средней квадратической случайной погрешностью.

Рассмотрим методику расчета погрешностей при окончательных операциях на примере круглого шлифования, поскольку именно на этих операциях окончательно формируется размер и качество обработанной поверхности.

При врезном шлифовании средняя квадратическая погрешность обработки, определяющая поле рассеяния размеров деталей, представляет собой результат суммирования следующих составляющих:

$$\Delta_{\text{сум}} = \sqrt{\Delta_{\text{ПС}}^2 + \Delta_{\text{ПД}}^2 + \Delta_{\text{СС}}^2 + \Delta_{\text{СД}}^2}, \quad (1)$$

где $\Delta_{\text{ПС}}$ – средняя квадратическая погрешность средства контроля в статических условиях; $\Delta_{\text{ПД}}$ – средняя квадратическая погрешность средства контроля в динамических условиях работы; $\Delta_{\text{СС}}$ – средняя квадратическая погрешность обработки в статических условиях; $\Delta_{\text{СД}}$ – средняя квадратическая погрешность обработки в динамических условиях работы.

Погрешность $\Delta_{\text{СС}}$ регламентируется паспортными данными средства контроля. Погрешность $\Delta_{\text{СД}}$ зависит от скорости V изменения размера в момент формирования окончательной команды. Погрешность $\Delta_{\text{СС}}$ зависит от времени срабатывания механизма отвода шлифовальной бабки и скорости V изменения размера в момент прекращения обработки. Погрешность $\Delta_{\text{СД}}$ зависит от температурных деформаций и некруглости обрабатываемых деталей в момент прекращения обработки.

Погрешность средств контроля в динамических условиях работы можно определить как:

$$\Delta_{\text{пд}} = \sqrt{(\bar{t}_{\text{п}} \Delta_v)^2 + (\bar{V} \Delta_{\text{пл}})^2}, \quad (2)$$

где $\bar{t}_{\text{п}}$ – среднее время срабатывания средств контроля (регламентируется паспортными данными); Δ_v – средняя квадратическая погрешность, характеризующая непостоянство скорости изменения размера при прекращении обработки (определяется экспериментально); $\bar{V}$ – средняя скорость изменения размера (определяется экспериментально); $\Delta_{\text{пл}}$ – средняя квадратическая погрешность, характеризующая непостоянство времени срабатывания средства контроля (регламентируется паспортными данными).

Погрешность обработки в статических условиях определяется выражением:

$$\Delta_{\text{сст}} = \sqrt{(\bar{t}_{\text{с}} \Delta_v)^2 + (\bar{V} \Delta_{\text{тс}})^2}, \quad (3)$$

где $\bar{t}_{\text{с}}$ – среднее время срабатывания станка (для большинства станков $\bar{t}_{\text{с}} = 0,15 \dots 0,25$ с); $\Delta_{\text{тс}}$ – средняя квадратическая погрешность, характеризующая непостоянство времени срабатывания станка (для большинства станков $\Delta_{\text{тс}} = 0,015 \dots 0,025$ с).

Погрешность обработки в динамических условиях работы:

$$\Delta_{\text{сд}} = \sqrt{\Delta_T^2 + \Delta_\phi^2}, \quad (4)$$

где Δ_T – средняя квадратическая погрешность, зависящая от температурной деформации детали; Δ_ϕ – средняя квадратическая погрешность, возникающая вследствие погрешности формы детали.

Погрешность, зависящую от температурных деформаций, можно определить как:

$$\Delta_T = \sqrt{\Delta_{\text{вТ}}^2 + \Delta_{\delta\text{Т}}^2}, \quad (5)$$

где $\Delta_{\text{вТ}}$ – средняя квадратическая погрешность, обусловленная температурной деформации детали и зависящая от величины подачи (определяется экспериментально); $\Delta_{\delta\text{Т}}$ – средняя квадратическая погрешность, обусловленная температурной деформации детали, зависящая от величины припуска, режущей способности круга (определяется экспериментально).

Представляет интерес изменение температурной деформации деталей в процессе врезного шлифования [10].

На рисунке 1 приведен экспериментальный график, характеризующий зависимость температурной деформации кольца $\Delta_{\text{т0}}$ диаметром 55 мм при шлифовании внутреннего отверстия диаметром 40 мм от времени обработки. Условия обработки: скорость резания $V_{\text{рез}} = 60$ м/с, цикл шлифования – врезание с подачей $S = 10,0$ мкм/с, частота вращения $n = 530$ мин⁻¹, припуск $a = 0,6$ мм, время шлифования 7 с (врезания – 2,8 с, время установившегося съема – 3 с, время выхаживания – 1,2 с).

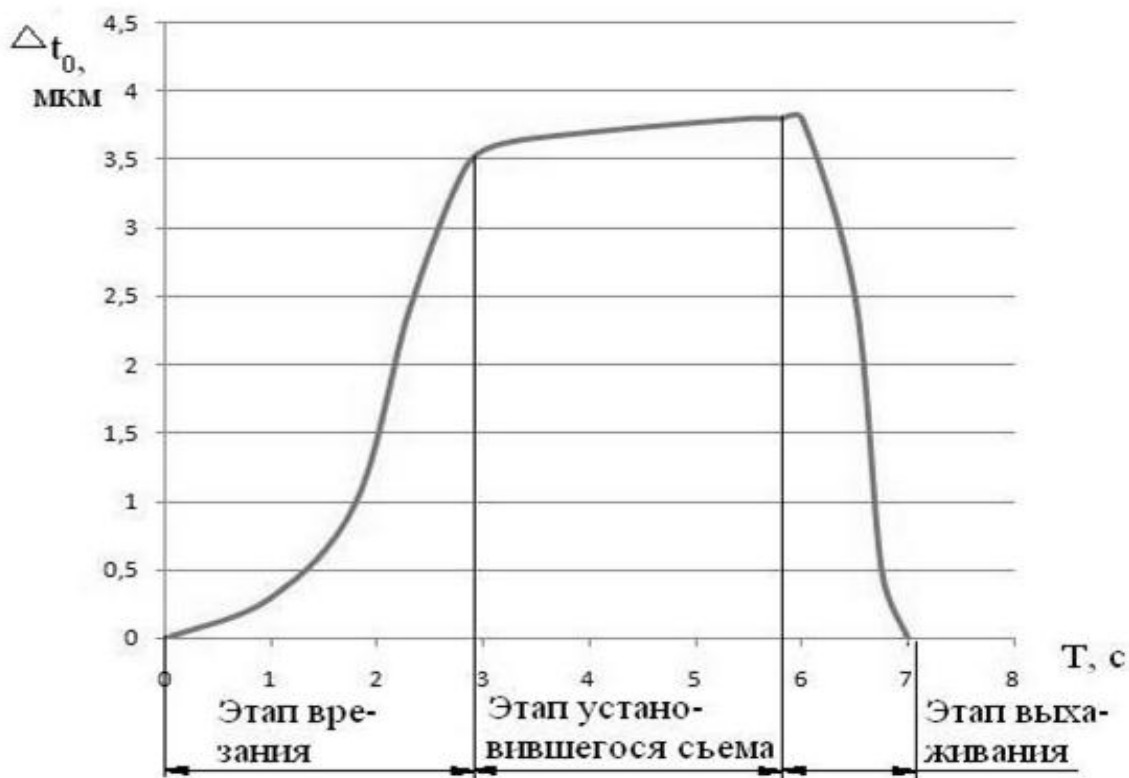


Рисунок 1 – Зависимость температурной деформации (Δt_0) от времени цикла шлифования [Dependence of temperature deformation (Δt_0) on the grinding cycle time]

Как видно из рисунка 1, на этапе врезания с некоторым запаздыванием температурные деформации увеличиваются. На этапе установившегося съема температурные деформации из-за инерционности тепловых процессов некоторое время продолжают расти и затем стабилизируются. На этапе выхаживания температурные деформации с некоторым запаздыванием уменьшаются.

Как показали исследования, на точность обработки большое влияние оказывают погрешности, обусловленные технологической системой «станок-приспособление-инструмент-деталь», а также технологические факторы [9].

Исследования показали влияние на нестабильность съема припуска: суммарная погрешность обработки возрастает с увеличением нестабильности скорости съема припуска [6]. Отмечено, что в процессе работы шлифовального станка происходит постепенный нагрев смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), приводящий к возникновению тепловых деформаций элементов станка и обрабатываемых деталей. Большой разброс величины припуска на обработку также является причиной возникновения погрешности обработки [7]. Разница в величине снимаемого припуска приводит к различному теплообразованию и соответственно к различным тепловым деформациям обрабатываемой детали.

На рисунке 2 показаны результаты измерения валов, обработанных методом врезания при различных подачах. Станок оснащен прибором контроля с настольной измерительной скобой, выдающим предварительную команду на прекращение подачи и включение выхаживания, и окончательную команду на отвод шлифовального круга. Припуск на обработку составляет 0,3 мм. Перед шлифованием каждой новой детали устанавливали новую подачу, величину которой измеряли в процессе шлифования.

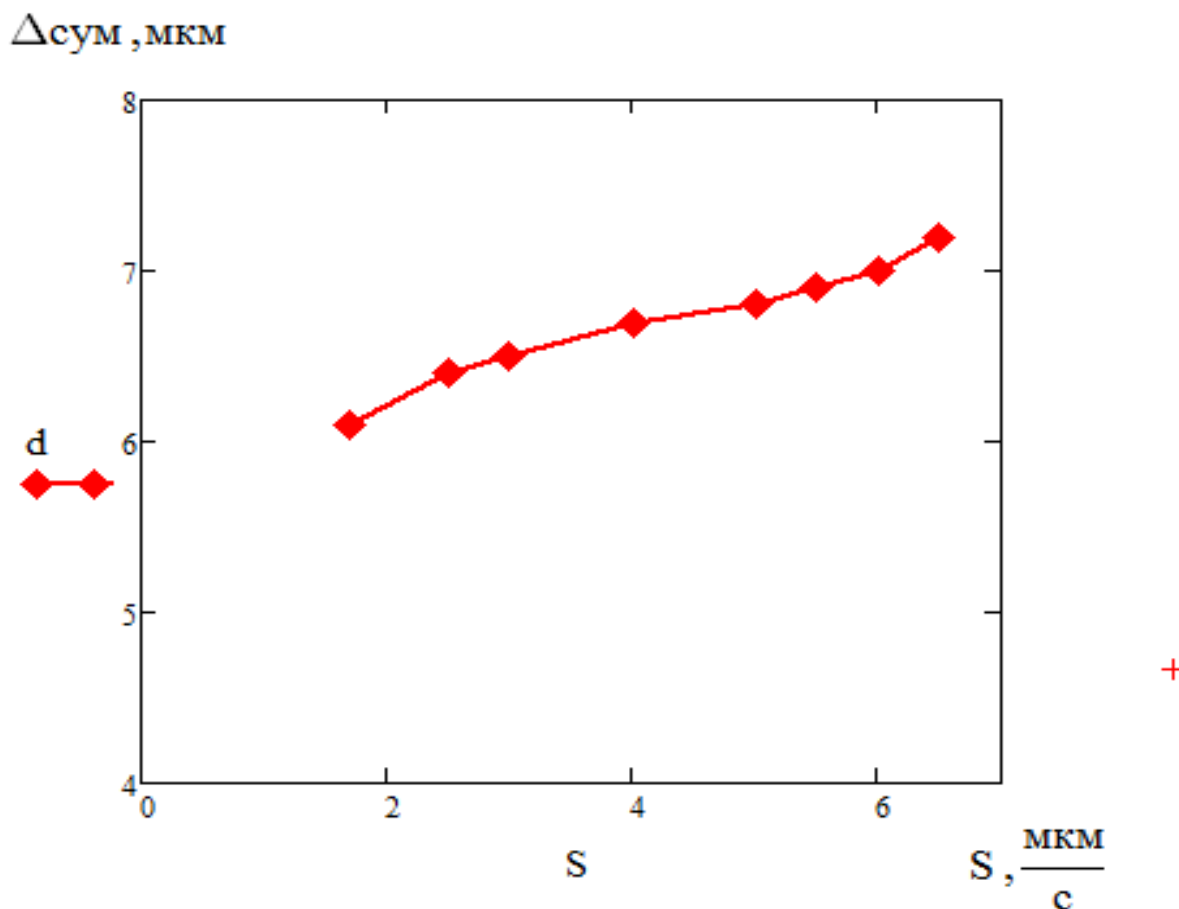


Рисунок 2 – Влияние подачи на погрешность обработки [Effect of transport to machining error]

Из графика видно, что с увеличением подач погрешность обработки увеличивается. Влияние величины подачи на размер вала может быть объяснено тем, что большей величине подачи соответствуют большие величины силовых и тепловых деформаций в конце обработки. В зависимости от величины подачи снимается больший или меньший слой металла в единицу времени, что приводит к различным теплообразованиям, вследствие чего к моменту выдачи окончательной команды детали в партии имеют разную температуру. После температурной стабилизации детали, шлифованные в более форсированном режиме, имеют меньший размер, чем детали, шлифованные в более мягких режимах.

Первоначально устройство контроля настраивают по специальной аттестованной детали. Температурную деформацию контролировали на необрабатываемой наружной поверхности одновременно с обработкой внутренней поверхности. В процессе шлифования кольцо нагревается и меняется его наружный диаметр.

Представляет интерес этап врезания, так как в это время в основном формируются температурные деформации. На рисунке 3 приведен экспериментальный график, характеризующий влияние подачи S на скорость съема припуска v , на температурные деформации Δ_{10} кольца при шлифовании внутреннего отверстия диаметром 40 мм на этапе врезания. Условия обработки: скорости съема припуска $v = 1,0; 5,0; 10,0; 15,0; 20,0; 25,0$ мкм/с.

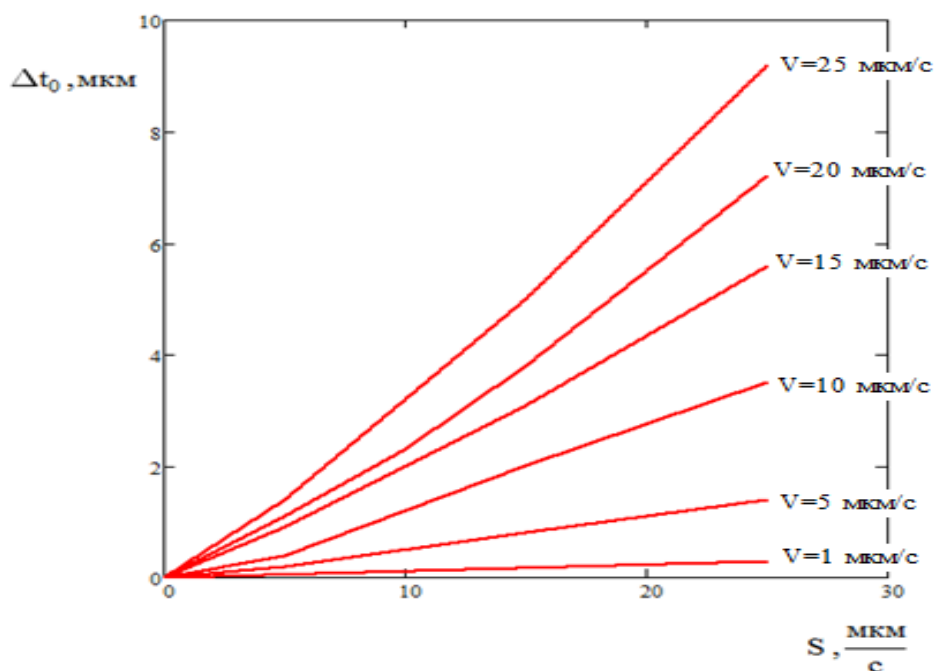


Рисунок 3 – Влияние скорости съема припуска (V) и подачи (S) на этапе врезания на температурную деформацию детали [Influence of the stock removal rate (V) and transport (S) during the plunge stage on the temperature deformation of the part]

Как видно из графика на этапе врезания с увеличением скорости съема припуска и подачи температурные деформации возрастают. Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе режима обработки деталей.

В условиях производства на финишную шлифовальную операцию детали поступают непосредственно с предварительных токарной и шлифовальной операций. Обработка на этих операциях ведется с интенсивными режимами и соответственно с большим теплообразованием [10]. Детали не успевают пройти процесс температурной стабилизации. Возникшие температурные деформации увеличивают погрешность обработки при окончательном шлифовании. Особенно это сказывается при обработке крупногабаритных деталей [2]. Поэтому целесообразно стабилизировать температуру заготовок для обеспечения высокой точности обрабатываемых деталей.

Как видно из графиков температурная деформация деталей возрастает с повышением скорости съема припуска и подачи, а так же увеличением нестабильность скорости съема припуска.

По графикам можно выбрать оптимальные значения параметров процесса обработки с целью стабилизации размерной точности детали в динамическом режиме их обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саункин, В.Т. Повышение производительности и точности автоматического контроля деталей [Текст] / В.Т. Саункин, С.Г. Онищук, С.Л. Миранцов // Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. – 2008. – № 1 (11). – С. 162-165.
2. Ковалевский, С.В. Типовые технологические процессы в тяжелом машиностроении [Текст] / С.В. Ковалевский, С.Г. Онищук, В.Т. Саункин – Донбасская государственная машиностроительная академия, 2009. – 124 с.

3. Саункин, В.Т. Исследование погрешности обработки при использовании средств активного контроля [Текст] / В.Т. Саункин, С.Л. Миранцов // Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. – 2009. – №2. – С. 150-153.
4. Саункин, В.Т. Исследование погрешности обработки деталей при использовании средств активного контроля [Текст] / В.Т. Саункин, С.Г. Онищук // Вестник Тернопольского государственного национального технического университета. – 2010. – Т.15. – Вып. 4. – С. 85-89.
5. Саункин, В.Т. Ошибки обработки деталей при использовании средств активного контроля [Текст] / В.Т. Саункин, С.Г. Онищук // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сборник научных трудов. Донбасская государственная машиностроительная академия. – 2010. – Вып. 27. – С. 136-140.
6. Ковалевский, С.В. Типовые технологические процессы в тяжелом машиностроении [Текст] / С.В. Ковалевский, В.Т. Саункин, О.Н. Волошин – Донбасская государственная машиностроительная академия, 2010. – 116 с.
7. Саункин, В.Т. Исследование погрешности обработки деталей при использовании средств активного контроля [Текст] / В.Т. Саункин, С.Г. Онищук // Вестник приазовского национального технического университета. – 2011. – Вып. 22. – С. 189-192.
8. Ковалевский, С.В. Технологии в области тяжелого машиностроения – процессов и управления [Текст] / С.В. Ковалевский, С.Г. Онищук, В.Т. Саункин // Vrnjacka, Banja: SATCIP, 2011. – 350 с.
9. Саункин, В.Т. Разработка методических рекомендаций оценки переходного процесса при механообработке крупногабаритных изделий [Текст] / В.Т. Саункин, Н.П. Григорьев, О.Е. Драка // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 1 (22) – С. 54-58.
10. Советов, Б.Я. Моделирование систем [текст]: учебник для вузов. / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – Москва : Высш. шк., 2005. – 343 с.

REFERENCES

- [1] Saunkin V.T., Onishhuk S.G., Miranczov S.L. Povyshenie proizvoditel'nosti i tochnosti avtomaticheskogo kontrolya detalej [Improving Performance and Accuracy of Automatic Parts Control]. Bulletin of the Donbass State Machine-Building Academy. 2008. № 1 (11). P. 162-165 (in Russian).
- [2] Kovalevskij S.V., Onishhuk S.G., Saunkin V.T. Tipovy'e tekhnologicheskie processy v tyazhelom mashinostroenii [Typical Technological Processes in Heavy Engineering]. Donbass State Machine-Building Academy. 2009. 124 p. (in Russian).
- [3] Saunkin V.T., Miranczov S.L. Issledovanie pogreshnosti obrabotki pri ispol'zovanii sredstv aktivnogo kontrolya [Investigation of Processing Error when Using Active]. Scientific Herald of the Donbass State Machine-Building Academy. 2009. №2. P. 150-153 (in Russian).
- [4] Saunkin V.T., Onishhuk S.G. Issledovanie pogreshnosti obrabotki detalej pri ispol'zovanii sredstv aktivnogo kontrolya [The Study of Accuracy of Machining Parts Using Active]. Bulletin of Ternopil State National Technical University. 2010. T.15. Issue. 4. P. 85-89 (in Russian).
- [5] Saunkin V.T., Onishhuk S.G. Oshibki obrabotki detalej pri ispol'zovanii sredstv aktivnogo kontrolya [Parts Processing Errors when Using Means of Active Control. Reliability of Tool and Optimization of Technological Systems: a Collection of Scientific Papers]. Donbass State Engineering Academy. 2010. Vol. 27. P. 136-140 (in Russian).
- [6] Kovalevskij S.V., Saunkin V.T., Voloshin O.N. Tipovy'e tekhnologicheskie processy v tyazhelom mashinostroenii [Typical Technological Processes in Heavy Engineering]. Donbass State Machine-Building Academy. 2010. 116 p. (in Russian).
- [7] Saunkin V.T., Onishhuk S.G. Issledovanie pogreshnosti obrabotki detalej pri ispol'zovanii sredstv aktivnogo kontrolya [The study of Accuracy of Machining Parts Using Active Control]. Bulletin of the Azov National Technical University. 2011. Vol. 22. P. 189-192 (in Russian).
- [8] Kovalevskij S.V., Onishhuk S.G., Saunkin V.T. Teknologii v oblasti tyazhelogo mashinostroeniya – processov i upravleniya [Technologies in the Field of Heavy Engineering - Processes and Management]. Vrnjacka, Banja: SATCIP, 2011. 350 p. (in Russian).
- [9] Saunkin V.T., Grigor'ev N.P., Draka O.E. Razrabotka metodicheskix rekomendacij ocenki perexodnogo processa pri mexanoobrabotke krupnogabaritny'x izdelij [Development of Guidelines for Assessing the Transition Process during the Machining of Large-Sized Products]. Global'naya yadernaya bezopasnost'. [Global Nuclear Safety]. 2017. № 1 (22). P. 54-58 (in Russian).
- [10] Sovietov, B.Ya., Yakovlev S.A. Modelirovanie sistem [System Modeling]. Moscow. Higher school. 2005. 343 p. (in Russian).

Development of Methodical Recommendations to Improve Treatment Accuracy of Nuclear Engineering Products

V.T. Saunkin^{1*}, V.V. Krivin, N.G.^{2*} Grigoriev^{3**}, O.E. Draka^{4*}

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

***«Atommash» the branch of «AEM-Technologies» JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russia*

¹ORCID ID: 000-0002-3462-4853

Wos Researcher ID: F-3352-2017

e-mail: saunkin@mail.ru

²ORCID ID: 0000-0003-0903-0786

Wos Researcher ID: E-2267-2018

e-mail: krivin1949@mail.ru

³ORCID ID: 000-0002-5654-5021

Wos Researcher ID: F-3370-2017

e-mail: grigoryev@mail.ru

⁴ORCID ID: 000-0002-3397-6830

Wos Researcher ID: F-3316-2017

e-mail: oed17@mail.ru

Abstract – The paper deals with the problem of increasing the accuracy of the processing of nuclear engineering products. The calculations show that the main (significant) component of the processing error is the dynamic error, that is, in the conditions of the system. Experimental studies is confirmed this conclusion and shows that the main factor is the temperature deformation of the product during processing. The influence of this factor can be minimized by changing the parameters of the processing modes so the experimental dependencies can be used.

Keywords: nuclear power engineering products, product dimensional accuracy, product temperature deformation, processing, technological mode of product processing.

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

УДК 621.039

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ
ГИДРОВАЛЬЦЕВАНИЯ НА СОСТОЯНИЕ
ПРЕССОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

© 2019 А.М. Смирнов*, В.В. Шишов**

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

***АО Опытное конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС», Подольск, Россия*

Актуализирована проблема выхода из строя коллекторов парогенераторов и выявлены ее причины, одной из которых является применение нерациональных технологических процессов закрепления теплообменных труб в трубные решетки. Приведены результаты исследования влияния технологии гидровальцевания на состояние прессовых соединений, которые позволили провести анализ существующей технологии и определить надежные критерии оценки качества соединений «труба-трубная доска»

Ключевые слова: прессовое соединение, теплообменные трубы, коллектор, гидровальцевание, зазор, натяг.

Поступила в редакцию 17.04.2019

После доработки 24.05.2019

Принята к публикации 31.05.2019

В современных атомных, энергетических, химических, нефтяных и других установках широко используются теплообменные аппараты различной конструкции. В качестве нагревательных элементов в них применяются трубчатые системы, состоящие из большого количества труб (от нескольких сотен до нескольких тысяч), по которым под высоким давлением прокачивается теплоноситель в виде воды, газа, жидкого металла.

К трубчатым аппаратам вообще и к узлам запрессовки труб в трубные доски и коллекторы особенно предъявляются очень высокие требования по надежности.

Многочисленными исследованиями Российских ученых [1, 2, 3] установлено, что одной из причин преждевременного выхода из строя коллекторов парогенераторов являются нерациональные технологические процессы их изготовления и, в первую очередь, технологические процессы запрессовки в них теплообменных труб, до недавнего времени использующие импульсную энергию взрывчатых веществ (метод «взрыва»).

Поиск более «мягких» процессов запрессовки теплообменных труб в трубные решетки и коллектора остается и сегодня весьма актуальной задачей.

К настоящему времени имеется немало работ, посвященных прессовым соединениям теплообменных труб с трубной решеткой, изготовленных роликовым вальцеванием [4, 5, 6], в которых проведен тщательный анализ факторов влияния на качество закрепления.

Процессы гидровальцевания, широко применяемые в технологиях создания узлов крепления труб, пока еще не достаточно изучены. Опыт применения и выполнения

исследований показали, что в настоящее время имеются вопросы, знание ответов на которые весьма важны для производства [1, 2].

Так в статье В.М. Терехов «Математическая модель процесса закрепления теплообменных труб посредством гидрораздачи» [7] в процессе цифрового моделирования гидрораздачи с использованием контактных элементов изучалась радиальная и осевая деформация трубы. Авторами наряду с результатами, имеющими хорошую сходимость с практическими данными, получено также, что осевая деформация трубы $\varnothing 16 \times 1,5$ длиной 160 мм после гидрораздачи может составлять значительную величину. На практике такого не наблюдалось [7, 8, 9].

В данной работе приведены некоторые исследования влияния технологии гидровальцевания на состояние прессовых соединений.

В качестве образца для исследований была выбрана семнадцатитрубная модель, имитирующая геометрические параметры глубоких отверстий ответственных теплообменных аппаратов для АЭС (рис. 1).

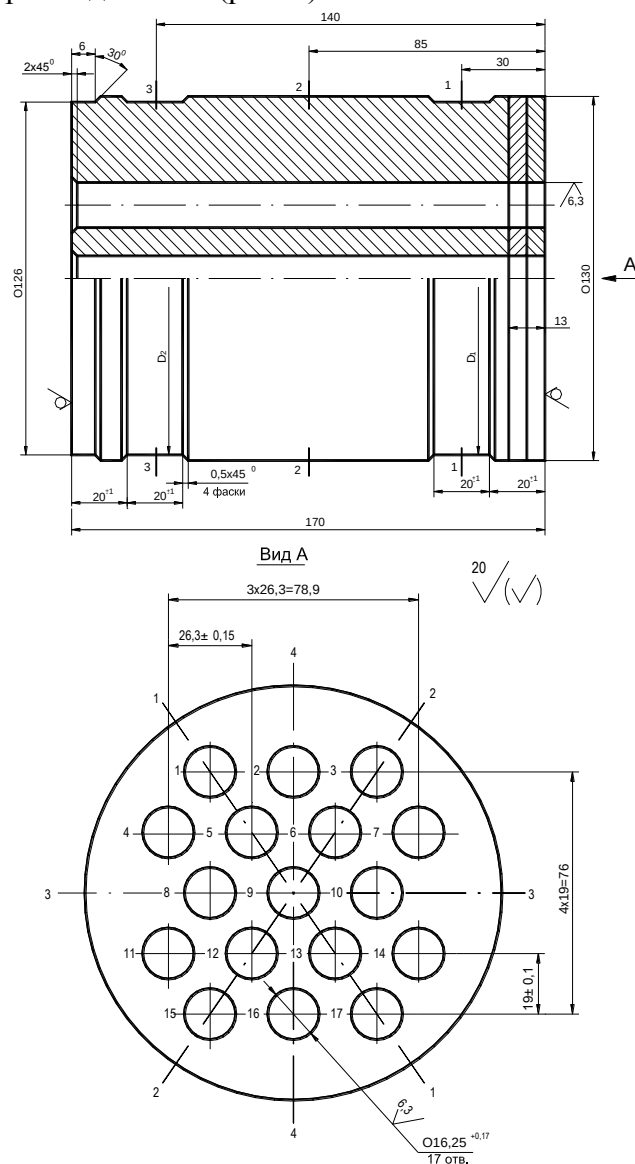


Рисунок 1 – Модель семнадцатитрубной доски [Model of seventeen pipe board]

До проведения гидровальцевания были проведены замеры труб по внутреннему и наружному диаметрам по трем сечениям (рис. 1) с определением максимального и минимального диаметра в каждом сечении. По размеру внутреннего диаметра ($d_{тр.вн}$)

проведена селекция на три группы: $d_{тр.вн} \leq 12,90$ мм; $d_{тр.вн} = 13 \pm 0,05$ мм; $d_{тр.вн} > 13,05$ мм. Аналогично проведены измерения минимальных, максимальных диаметров и селекция отверстий в моделях. Измерения наружных диаметров моделей D_1 и D_2 проводились в 4-х плоскостях (по осям 1-1; 2-2; 3-3; 4-4, рис. 1) на специально выполненных проточках.

После гидроразвальцевания труб в трубной решетке (модели) проводились следующие измерения:

- минимального ($d_{тр.вн.мин}$) и максимального ($d_{тр.вн.мах}$) внутреннего диаметра трубы в трех сечениях по длине;
- наружных диаметров трубной решетки (D_1 и D_2) в 4-х плоскостях;
- длины трубы L ;
- длины участка гидрораздачи l_p и участка перехода от развальцованной к неразвальцованной части трубы.

По результатам измерений расчетным путем определялись следующие показатели прессового соединения:

- минимальные ($S_{мин}$) и максимальные ($S_{мах}$) зазоры между трубой и поверхностью отверстия в трубной решетке до вальцевания;
- минимальное ($\Delta d_{мин}$) и максимальное ($\Delta d_{мах}$) увеличение внутреннего диаметра трубы после вальцевания;
- изменение длины трубы (ΔL) в результате вальцевания;
- минимальную ($\rho_{мин}$) и максимальную ($\rho_{мах}$) степень запрессовки трубы в трубной решетке в сечениях 1-1; 2-2; 3-3 по формулам (1) и (2):

$$\rho_{мин} = ((\Delta d_{мин} - S_{мах}) / d_{отв. мин}) * 100\%, \quad (1)$$

$$\rho_{мах} = ((\Delta d_{мах} - S_{мин}) / d_{отв. мах}) * 100\%, \quad (2)$$

где $d_{отв. мин}$, $d_{отв. мах}$ – минимальный и максимальный размер диаметра отверстия в сечениях 1-1; 2-2; 3-3.

Кроме указанных параметров экспериментально определялась сила вырыва трубы из модели.

Исследования были выполнены на одиннадцати семнадцатитрубных моделях.

В таблицах 1 и 2 приведены наиболее характерные результаты исследований, полученные на моделях.

Таблица 1 – Параметры до гидроразвальцовки [Parameters before hydraulic expansion]

№ отв.	d _{отв. min} , (мм) d _{отв. max} , (мм)			d _{тр. нар. ср.} , (мм)			S _{min} , (мм) S _{max} , (мм)			d _{тр. вн. min} , (мм) d _{тр. вн. max} , (мм)		
	1-1	2-2	3-3	1-1	2-2	3-3	1-1	2-2	3-3	1-1	2-2	3-3
1	16,45	16,53	16,52	15,96	15,97	15,96	0,49	0,56	0,56	12,85	12,82	12,84
	16,57	16,55	16,55				0,61	0,58	0,59	12,95	12,93	12,97
2	16,51	16,55	16,53	15,97	15,98	15,97	0,54	0,57	0,56	12,85	12,86	12,83
	16,59	16,55	16,60				0,62	0,57	0,63	12,99	12,94	12,97
3	16,53	16,53	16,55	15,96	15,97	15,97	0,57	0,56	0,58	12,82	12,86	12,84
	16,57	16,55	16,60				0,61	0,58	0,63	12,95	12,92	12,96
4	16,59	16,55	16,59	15,98	15,97	15,97	0,61	0,58	0,62	12,84	12,84	12,84
	16,59	16,59	16,60				0,61	0,62	0,63	12,92	12,96	12,93
5	16,58	16,57	16,56	15,96	15,97	15,97	0,62	0,60	0,59	12,84	12,84	12,89
	16,60	16,60	16,57				0,64	0,60	0,60	12,92	12,98	12,99
6	16,52	16,50	16,49	15,96	15,96	15,97	0,56	0,54	0,52	12,83	12,83	12,93
	16,60	16,57	16,60				0,64	0,61	0,63	12,93	12,93	12,95
7	16,55	16,55	16,54	15,96	15,97	15,96	0,59	0,58	0,58	12,86	12,85	12,85
	16,55	16,55	16,60				0,59	0,58	0,64	13,00	12,98	12,94

Продолжение таблицы 1

№ отв.	d _{отв.min} , (мм) d _{отв.max} , (мм)			d _{тр.нар.ср.} , (мм)			S _{min} , (мм) S _{max} , (мм)			d _{тр.вн.min} , (мм) d _{тр.вн.max} , (мм)		
	1-1	2-2	3-3	1-1	2-2	3-3	1-1	2-2	3-3	1-1	2-2	3-3
8	16,54	16,50	16,54	15,97	15,98	15,98	0,57	0,52	0,56	12,85	12,82	12,84
	16,55	16,55	16,57				0,58	0,57	0,59	12,91	12,94	12,96
9	16,55	16,55	16,54	15,97	15,98	15,97	0,58	0,57	0,57	12,86	12,86	12,89
	16,55	16,60	16,60				0,58	0,62	0,63	12,92	12,99	12,95
10	16,54	16,55	16,54	15,88	15,88	15,89	0,66	0,67	0,65	12,80	12,85	12,85
	16,55	16,55	16,60				0,67	0,67	0,71	12,95	13,02	13,02
11	16,60	16,60	16,60	15,90	15,88	15,89	0,70	0,72	0,71	12,90	12,85	12,82
	16,60	16,60	16,60				0,70	0,72	0,71	13,07	13,02	12,92
12	16,53	16,50	16,55	15,89	15,88	15,89	0,64	0,62	0,66	12,82	12,80	12,82
	16,55	16,56	16,56				0,66	0,68	0,66	13,00	12,96	12,99
13	16,50	16,52	16,55	15,90	15,90	15,90	0,60	0,62	0,65	12,80	12,81	12,82
	16,60	16,57	16,56				0,70	0,67	0,66	12,98	13,20	13,00
14	16,53	16,52	16,55	15,88	15,86	15,87	0,65	0,66	0,68	12,80	12,83	12,81
	16,55	16,55	16,55				0,67	0,69	0,68	12,95	12,98	12,97
15	16,50	16,55	16,52	15,89	15,89	15,89	0,61	0,66	0,63	12,80	12,78	12,78
	16,57	16,60	16,60				0,68	0,71	0,71	12,95	12,90	12,96
16	16,55	16,50	16,55	15,88	15,87	15,88	0,67	0,63	0,67	12,78	12,82	12,83
	16,55	16,55	16,55				0,67	0,68	0,67	13,02	13,02	13,05
17	16,53	16,50	16,52	15,88	15,87	15,88	0,65	0,63	0,64	12,83	12,82	12,85
	16,55	16,57	16,56				0,67	0,70	0,68	13,03	12,98	13,02

Из гистограммы распределения длины гидрораздачи труб, представленной на рис 2. видно, что длина участка развальцовки труб в основном укладывается в размер 168 ± 1 мм.

Анализ таблиц 1 и 2 показывает, что расчет степени запрессовки по существующему методу без учета отклонений от круглости отверстий, трубок и непрямолинейности продольной оси в большинстве случаев приводит к отрицательной степени запрессовки. Это значит, что в соединениях имеются зазоры, а не натяги, и сила вырыва должна равняться нулю.

Таблица 2 – Параметры после гидроразвальцовки [Parameters after hydraulic expansion]

№ отв.	$d_{тр.вн.min}$ (мм) $d_{тр.вн.max}$ (мм)			Δd_{min} (мм) Δd_{max} (мм)			ρ_{min} ,% ρ_{max} ,%			F, 10^{-3} Н	ΔL , (мм)
	1-1	2-2	3-3	1-1	2-2	3-3	1-1	2-2	3-3		
1	13,35	13,40	13,34	0,40	0,47	0,37	-1,27	-0,66	-1,33	15,6	1,7
	13,60	13,48	13,52	0,75	0,66	0,68	1,58	0,6	0,77		
2	13,30	13,38	13,30	0,31	0,44	0,33	-1,87	-0,79	-1,81	16,4	1,6
	13,40	13,48	13,46	0,55	0,62	0,63	0,06	0,08	0,42		
3	13,30	13,34	13,31	0,35	0,40	0,35	-1,58	-1,09	-1,69	13,8	1,75
	13,40	13,43	13,46	0,58	0,57	0,62	0,06	0,06	0,24		
4	13,30	13,39	13,33	0,38	0,37	0,40	-1,39	-1,51	-1,39	13,6	1,60
	13,40	13,49	13,42	0,56	0,56	0,58	0,3	0,12	0,24		
5	13,40	13,36	13,40	0,48	0,38	0,41	-0,96	-1,33	-1,09	13,1	1,65
	13,50	13,49	13,51	0,66	0,65	0,62	0,24	0,30	0,18		
6	13,35	13,40	13,31	0,42	0,47	0,42	-1,33	-0,84	1,27	14,0	1,95
	13,45	13,48	13,52	0,62	0,65	0,59	0,36	0,67	0,42		
7	13,37	13,40	13,39	0,37	0,42	0,45	-1,33	-0,97	-1,14	14,3	1,70
	13,50	13,52	13,48	0,66	0,67	0,63	0,79	0,54	0,3		

Продолжение таблицы 2

№ отв.	$d_{тр.вн. min}$ (мм)			Δd_{min} (мм)			ρ_{min} ,%			F, 10 ⁻³ Н	ΔL , (мм)
	$d_{тр.вн. max}$ (мм)			Δd_{max} (мм)			ρ_{max} ,%				
	1-1	2-2	3-3	1-1	2-2	3-3	1-1	2-2	3-3		
8	13,30	13,32	13,35	0,39	0,41	0,39	-1,15	-0,97	-1,21	14,1	1,65
	13,40	13,50	13,50	0,55	0,68	0,66	0,12	0,97	0,6		
9	13,35	13,38	13,39	0,43	0,39	0,44	-0,91	-1,81	-1,14	15,1	1,65
	13,46	13,50	13,47	0,60	0,66	0,58	0,12	0,54	0,06		
10	13,40	13,44	13,45	0,35	0,38	0,47	-1,93	-1,75	-1,69	9,0	1,95
	13,60	13,65	13,65	0,80	0,80	0,80	0,85	0,79	0,54		
11	13,50	13,42	13,35	0,43	0,40	0,43	-1,63	-1,93	-1,63	14,1	2,20
	13,65	13,64	13,55	0,75	0,79	0,73	0,3	0,42	0,19		
12	13,43	13,42	13,44	0,43	0,45	0,45	-1,39	-1,39	-1,27	17,6	1,95
	13,60	13,59	13,60	0,78	0,79	0,78	0,85	1,03	0,73		
13	13,40	13,43	13,47	0,42	0,23	0,47	-1,69	-2,66	-0,97	16,9	1,95
	13,50	13,60	13,64	0,70	0,79	0,82	0,61	1,03	1,03		
14	13,35	13,47	13,42	0,40	0,49	0,45	-1,63	-1,21	-1,39	0	1,95
	13,45	13,62	13,59	0,65	0,79	0,78	0	0,79	0,60		
15	13,37	13,42	13,45	0,42	0,52	0,49	-1,57	-1,44	-1,33	16,88	2,0
	13,55	13,62	13,61	0,75	0,84	0,83	0,85	1,09	1,21		
16	13,40	13,50	13,50	0,38	0,48	0,45	-1,75	-1,21	-1,33	15,4	1,90
	13,57	13,65	13,62	0,79	0,83	0,79	0,73	1,21	0,73		
17	13,40	13,48	13,47	0,37	0,50	0,45	-1,85	-1,21	-1,39	15,75	2,15
	13,67	13,65	13,67	0,84	0,83	0,82	1,15	1,21	1,09		

Фактически же сила вырыва трубы из соединений с отрицательной степенью запрессовки находится на одном уровне с силой вырыва из соединений с положительной степенью запрессовки и слабо зависит от расчетной степени запрессовки.

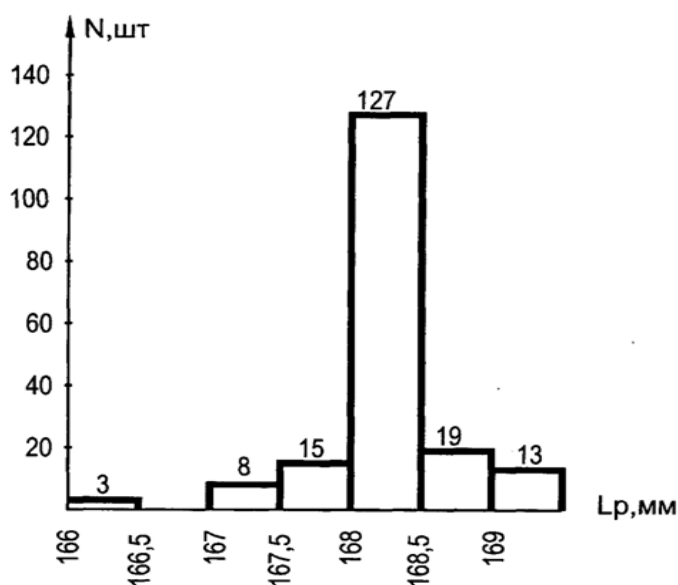


Рисунок 2 – Гистограмма распределения длины гидрораздачи труб в семнадцатитрубных моделях
[Histogram of the hydraulic distribution length distribution of pipes in seventeen pipe models]

Металлографические исследования зазоров в соединениях по периметру также показали, что их величина не связана с расчетной величиной степени запрессовки конкретного соединения и находится в пределах от 0 до 20 мкм. Анализ табличных данных не позволил выявить взаимосвязь силы вырыва с геометрическими параметрами отверстий и труб. Для этого необходимо проведение специальных исследований. Однако приведенные выше результаты дают основание считать, что именно отклонения от круглости и цилиндричности отверстий и труб с различной направленностью по длине отверстий приводят к значительным колебаниям степени запрессовки.

На рисунках 3 и 4 приведены гистограммы распределения степеней запрессовки, рассчитанных по средним значениям (ρ_{cp}) и по предельным значениям (ρ_{min} , ρ_{max}) для моделей 1-3 и 4-3.

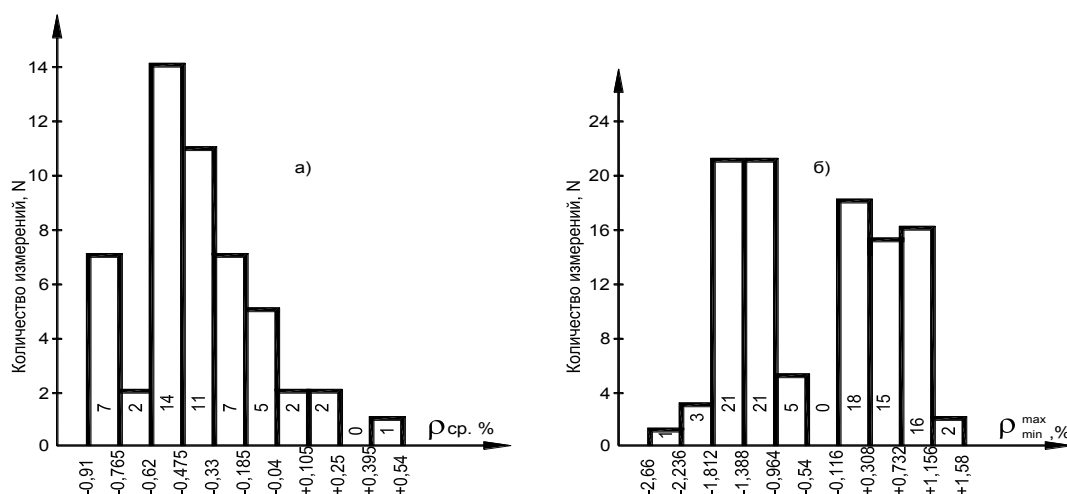


Рисунок 3 – Распределение степени запрессовки труб в семнадцатитрубной модели № 1-3, рассчитанной по результатам измерений в 3-х сечениях по глубине: а – по среднему сечению (ρ_{cp}); б – с учетом максимальных и минимальных значений ($\rho_{max, min}^{max}$) [The distribution of pipe pressing degree in the seven-pipe model No. 1-3, calculated by the results of measurements in 3 sections by depth: a – by average section ρ_{cp} ; b – taking into account the maximum and minimum values ($\rho_{max, min}^{max}$)]

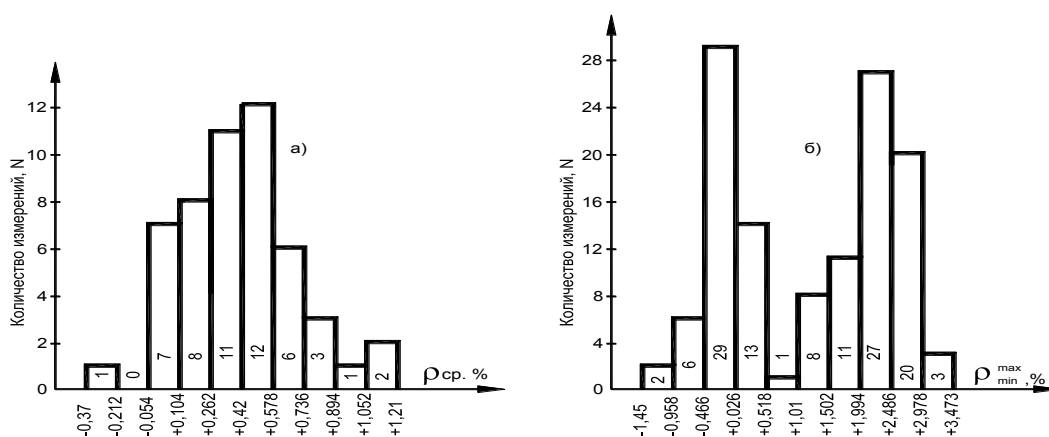


Рисунок 4 – Распределение степени запрессовки труб в семнадцатитрубной модели № 4-3, рассчитанное по результатам измерений в 3-х сечениях по глубине: а – по среднему значению (ρ_{cp}); б – с учетом максимальных и минимальных значений ($\rho_{max, min}^{max}$) [The distribution of pipe pressing degree in the seventeen-tube model No. 4-3, calculated from the results of measurements in 3 sections by depth: a – by the mean value (ρ_{cp}); b – taking into account the maximum and minimum values ($\rho_{max, min}^{max}$)]

Расчеты велись по результатам измерения минимальных и максимальных диаметров отверстий и труб до запрессовки, а также внутренних диаметров после запрессовки в 3-х сечениях по глубине отверстия (30, 85 и 140 мм от поверхности «зеркала» модели). Из рисунка 3 следует, что при расчете по средней степени запрессовки только одно измерение из 51 обеспечивает положительную запрессовку (без зазора). Если же расчеты вести по $\rho_{\max}$, то соединений с положительной степенью запрессовки будет 51 из 102. Качественно такой же характер изменения степени запрессовки наблюдается тогда, когда превалируют соединения с положительным значением степени запрессовки (рис. 4).

Приведенные результаты исследований дают основание считать, что расчетная степень запрессовки при гидровальцевании труб не может служить надежным критерием оценки качества соединений «труба – трубная доска». Таким критерием может быть рабочее давление жидкости и время выдержки, гарантированно обеспечивающие требуемое качество соединения при условии строгого соблюдения требований по точности формы и размеров отверстий и труб. Это положение подтверждается зарубежным опытом («VITKOVICE» (Чехия), «BALCKE DÜRR» (Германия), а также работами, выполненными в ГНЦ РФ АО «ЦНИИТМАШ».

После установления рациональной конструкции и размеров зондов было проведено исследование и отработка рациональных режимов запрессовки теплообменных труб. Для этого было изготовлено 12 однотрубных образцов (рис. 5) из стали 08X18H10T-ВД, в которых трубы запрессовывались при различном рабочем давлении воды (от 196 до 343 МПа с интервалом 49 МПа) и времени выдержки (от 5 до 10 сек).

После гидрозапрессовки по 2 образца каждого режима были подвергнуты механической довальцовке и испытаниям на вырыв. Остальные образцы разрезались на темплеты и на них проводились металлографические исследования.

В таблицах 3 и 4 приведены результаты измерения геометрических размеров и испытаний на вырыв и определения зазоров (табл. 5).

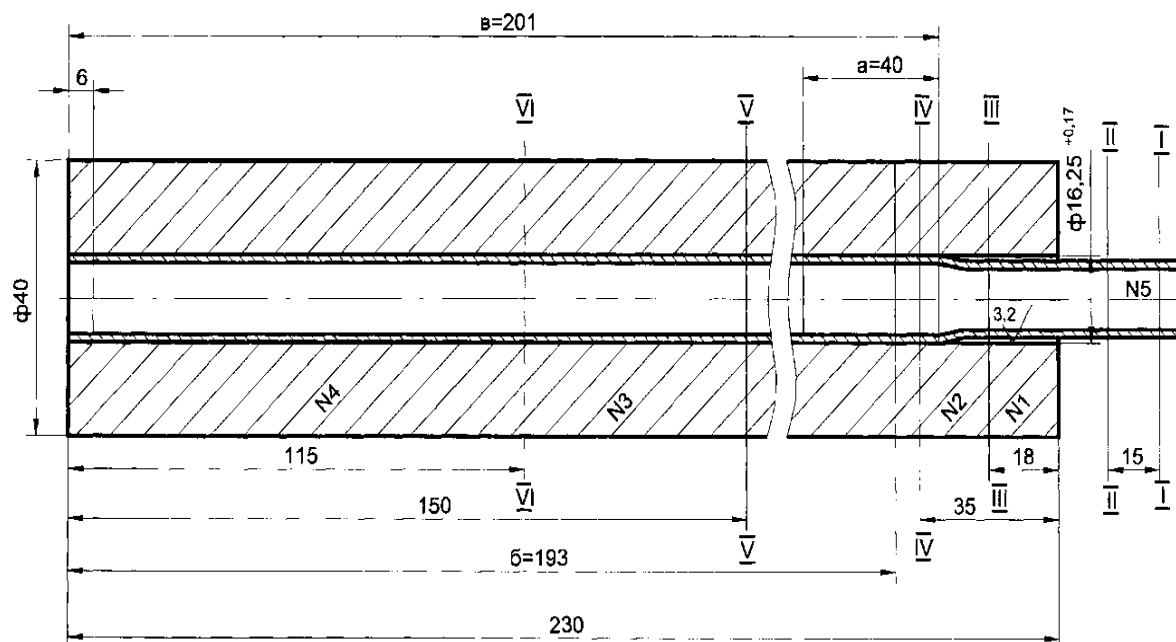


Рисунок 5 – Конструкция однотрубного образца и схема его разрезки для металлографических исследований: а – зона довальцовки; б – зона гидровальцовки; в – зона подвальцовки + гидровальцовки + довальцовки [Design of a single-tube sample and a scheme for its cutting for metallographic studies: a – further folding zone; b – hydrovalve zone; c – zone of rerolling + hydraulic rolling + uprolling]

Таблица 3 – Результаты замеров геометрических размеров и испытаний на вырыв [Results of measurements of geometric dimensions and tests for digging]

Номер образца	Режим гидрозапрессовки, МПа	Размеры до гидрозапрессовки					Геометрические размеры после гидрозапрессовки			
		Диаметр отверстия, мм	Наружный диаметр трубы, мм	Величина зазора, мм	Внутренний диаметр трубы, мм	Длина участка трубы l, мм	Внутренний диаметр трубы, мм	Величина раздачи, мм	Длина участка трубы l ₁ , мм	Длина участка переходной зоны, мм
1	196	16,39	16,01	0,38	12,81 13,01	52,3	13,23 13,48	0,41 0,47	51,0	6,0
2	196	16,39	15,95	0,44	12,94 13,03	52,4	13,41 13,55	0,47 0,52	51,5	6,0
3	196	16,40	15,98	0,42	13,01 13,09	52,1	13,52 13,58	0,51 0,49	51,1	6,5
4	245	16,35 16,38	15,99	0,36 0,39	13,06 13,15	52,6	13,52 13,60	0,46 0,45	51,6	6,0
5	245	16,38	16,00	0,38	13,06 13,10	52,5	13,48 13,52	0,42 0,42	51,4	6,0
6	245	16,37 16,39	15,92	0,45 0,47	12,80 13,13	51,3	13,32 13,58	0,52 0,45	50,1	6,0
7	294	16,40	15,96	0,44	13,02 13,11	52,4	13,54 13,62	0,52 0,51	51,2	6,0
8	294	16,40	15,95	0,45	13,01 13,13	52,6	13,55 13,68	0,54 0,55	51,4	7,5
9	294	16,40	15,96	0,44	12,86 12,93	52,8	13,38 13,44	0,52 0,51	51,6	7,0
10	343	16,39	15,90	0,49	13,01 13,16	52,5	13,59 13,78	0,58 0,62	50,4	6,0
11	343	16,40	15,96	0,44	12,80 13,05	52,3	13,38 13,62	0,58 0,57	50,1	7,0
12	343	16,40	15,93	0,47	12,86 13,15	51,4	13,34 13,66	0,43 0,51	50,3	6,5

Таблица 4 – Результаты замеров геометрических размеров и испытаний на вырыв [Results of measurements of geometric dimensions and tests for digging]

Номер образца	Величина изменения длины участка трубы (l-l ₁), мм	Размеры до довальцовки		Размеры после довальцовки		Величина раздачи в зоне довальцовки, мм	Величина изменения длины участка трубы (l ₂ -l ₁), мм	Разность внутренних диаметров труб, мм	Наличие (отсутствие) довальцовки, +(-)	Усилие вырыва трубы, Н
		Внутренний диаметр трубы, мм	Длина участка трубы l ₁ , мм	Внутренний диаметр трубы в месте довальцовки, мм	Длина участка трубы l ₂ , мм					
1	-1,3	12,80 13,0	51,0	13,21 13,44	51,2	0,41 0,44	+0,2	0,02 0,04	+	-
2	-0,9	12,97 13,04	51,5	13,41 13,55	51,7	0,44 0,51	+0,2	0 0	+	7840
3	-1,0	12,99 13,07	-	-	-	-	-	-	-	686
4	-1,0	13,05 13,16	-	-	-	-	-	-	-	1176
5	-1,1	13,05 13,10	-	13,45 13,54	51,6	0,40 0,44	+0,2	0,03 0,02	+	-
6	-1,2	12,81 13,07	50,1	13,39; 13,64	50,4	0,58 0,57	+0,3	0,07 0,06	+	7840
7	-1,2	12,98 13,05	-	-	-	-	-	-	-	784
8	-1,2	13,04 13,14	-	13,52 13,61	51,7	0,48 0,47	+0,3	0,03 0,07	+	-
9	-1,2	12,81 12,92	51,6	13,39 13,48	51,8	0,58 0,56	+0,2	0,01 0,04	+	6860
10	-1,1	13,00 13,17	50,4	13,63 13,67	50,6	0,63 0,60	+0,2	0,04 0,11	+	-
11	-1,2	12,83 13,06	50,1	13,40 13,67	50,4	0,57 0,61	+0,2	0,02 0,05	+	17248
12	-1,1	12,83 13,09	-	-	-	-	-	-	-	5292

Таблица 5 – Результаты замеров величин зазоров в соединениях «втулка-труба» [Results of measurements of the magnitudes of the gaps in the «sleeve-pipe» connections]

Номер образца	Режим гидрозапрессовки, МПа	Исследуемая зона	Номер темплета	Величина зазора, мкм	Протяженность зазора по периметру, %
1	196	гидрозапрессовка	2	2-5	80
				10-20	20
4	245	гидрозапрессовка	2	1-2	90
				5	10
7	294	гидрозапрессовка	2	2-5	80
				10-20	20
10	343	гидрозапрессовка	2	2-5	90
				10-20	10
1	196	гидрозапрессовка плюс довальцовка	3	1-2	70
				5-20	30
4	245	гидрозапрессовка плюс довальцовка	3	1-2	90
				5	10
7	294	гидрозапрессовка плюс довальцовка	3	2-5	80
				10-20	20
10	343	гидрозапрессовка плюс довальцовка	3	2-5	90
				10-20	10

По экспериментальным данным, приведенным в этих таблицах, можно сделать следующее заключение:

– При исходном зазоре 0,38...0,49 мм величина раздачи труб составляет 0,41...0,62 мм и находится в прямой зависимости от начального зазора (наружного и внутреннего диаметра трубы). Разность между величиной раздачи и величиной исходного зазора составляет 0,04...0,14 мм, что согласуется с данными, опубликованными в технической литературе.

– Укорочение труб после их гидрозапрессовки составляет 0,9...1,3 мм и при постоянной длине запрессовываемого участка зависит в основном от величины исходного зазора. Толщина стенки трубы практически не уменьшается.

– Механическая довальцовка после гидрозапрессовки трубы приводит к их удлинению на 0,2...0,3 мм.

– Разность внутреннего диаметра труб в зонах гидрозапрессовки и довальцовки составляет 0...0,11 мм.

– Сила вырыва трубы после гидрозапрессовки зависит от рабочего давления жидкости и составляет: 686...1176 Н при давлении 196...294 МПа; 5392 Н при давлении 343 МПа.

– Механическая довальцовка труб после гидрозапрессовки увеличивает силу вырыва до 6860...17248 Н. При таком большом диапазоне колебаний не прослеживается зависимость силы вырыва от рабочего давления гидрозапрессовки при его изменении в пределах 196...343 МПа.

– Опыты с изменением времени выдержки рабочего давления гидравлического зажима от 5 до 10 секунд показали, что при выдержке 5 секунд процесс упруго-пластических деформаций в системе «трубная решетка-труба-зонд-уплотнительные кольца» заканчивается, разрушений уплотнительных колец не происходит и обеспечивается заданное усилие вырыва.

– Величина зазора в соединении «труба-трубная доска» по всему периметру не превышает 20 мкм как после запрессовки, так и после довальцовки независимо от изменения рабочего давления в исследованном диапазоне (196...343 МПа).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Терехов, В.М. Технологические основы обеспечения качества глубоких отверстий и соединений теплообменных труб с трубными решетками и коллекторами аппаратов атомных энергоустановок: дис. докт. техн. наук [Текст] / В.М. Терехов. – Москва, 2006. – 476 с.
- 2 Кондратенко, Л.А. Расчетно-экспериментальные методы исследования технологических напряжений и деформаций в неразъемных трубных соединениях энергоустановок: автореф. докт. техн. наук [Текст] / Л.А. Кондратенко. – Москва, 2017. – 48 с.
- 3 Овсенко, А.И. Поверхностный слой деталей: проблемы технологического обеспечения качества [Текст] // Влияние технологии на состояние поверхностного слоя: материалы междунар. конф. – Познань, 2002. – С. 411-415.
- 4 Кондратенко, Л.А. К вопросу об упрочнении материала вальцовочных соединений в теплообменных аппаратах [Текст] / Л.А. Кондратенко, Л.И. Миронова // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2016. – №3. – С. 106-112.
- 5 Кондратенко, Л.А. К вопросу о влиянии динамики роликового вальцевания на качество изготовления теплообменных аппаратов в атомных энергетических установках [Текст] / Л.А. Кондратенко, В.М. Терехов, Л.И. Миронова // Тяжелое машиностроение. – 2016. – № 10. – С. 10-14.
- 6 Кондратенко, Л.А. Анализ некоторых проблем механического закрепления теплообменных биметаллических труб в энергетических установках [Текст] / В.М. Терехов, Л.И. Миронова // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2017. – № 3. – С. 83-88.
- 7 Терехов, В.М. Математическая модель процесса закрепления теплообменных труб посредством гидрораздачи [Текст] / В.М. Терехов, Л.А. Кондратенко // Технология машиностроения. – 2001. – № 1. – С. 55-57.

- 8 Кондратенко, Л.А. Технологические возможности теплообменных труб в операции закрепления [Текст] / Л.А. Кондратенко, В.М. Терехов, В.С. Винников, А.С. // Технология машиностроения. – 2014. – № 7. – С. 28-33.
- 9 Смирнов, А.М. Исследование состояния поверхностного слоя теплообменных труб из высоколегированных сталей аустенитного класса [Текст] / А.М. Смирнов, Л.И. Миронова, В.М. Терехов, Л.А. Кондратенко // Новые материалы и перспективные технологии: материалы IV Междисциплинарного научного форума. Москва, 20-23 ноября 2018 г. – Т.1. – Москва : ИМАШ РАН, 2018. – С. 814-818.
- 10 Смирнов, А.М. Особенности технологии раздачи теплообменных труб достаточной толщины и оценка качества прессовых соединений [Текст] / А.М. Смирнов, В.М. Терехов, А.С. Аверин // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2019. – № 1. – С. 150-155.

REFERENCES

- [1] Terekhov V.M. Tekhnologicheskie osnovy obespecheniya kachestva glubokih otverstij i soedinenij teploobmennyyh trub s trubnymi reshetkami i kollektorami apparatov atomnyh ehnergoustanovok: dis. dokt. tekhn. nauk [Technological Basis for Quality Assurance of Deep Holes and Heat Exchanger Tube Connections with Tube Sheets and Collectors of Nuclear Power Plants. Thesis]. Moscow. 2006 (in Russian).
- [2] Kondratenko L.A. Raschetno-ehksperimental'nye metody issledovaniya tekhnologicheskikh napryazhenij i deformacij v neraz"emnyh trubnyh soedineniyah ehnergoustanovok: avtoref. dokt. tekhn. nauk [Computational and Experimental Methods for Studying Technological Stresses and Deformations in Permanent Pipe Joints of Power Plants: Thesis abstract]. Moscow. 2017 (in Russian).
- [3] Ovseenko A.I. Poverhnostnyj sloj detalej: problemy tekhnologicheskogo obespecheniya kachestva. Sbornik materialov: Vliyanie tekhnologii na sostoyanie poverhnostnogo sloya [Surface Layer Details: the Problems of Technological Quality Assurance]. Poznan'. 2002. P. 411-415.
- [4] Kondratenko L.A., Mironova L.I. K voprosu ob uprochnenii materiala val'covochnyh soedinenij v teploobmennyyh apparatah [Hardening of Material of Milling Connections in Heatexchange Devices]. Engineering & Automation Problems. 2016 № 3. P. 106-112 (in Russian).
- [5] Kondratenko L.A., Terekhov V.M., Mironova L.I. K voprosu o vliyaniy dinamiki rolikovogo val'cevaniya na kachestvo izgotovleniya teploobmennyyh apparatov v atomnyh ehnergeticheskikh ustanovkah [Effect of Roller Rolling Dynamics on the Quality of Manufacture of Heat Exchangers of Nuclear Power Units]. Heavy engineering construction. 2016. № 3. P. 10-14 (in Russian).
- [6] Kondratenko L.A., Terekhov V.M., Mironova L.I. Analiz nekotoryh problem mekhanicheskogo zakrepleniya teploobmennyyh bimetallicheskih trub v ehnergeticheskikh ustanovkah [Analysis of Some Problems of Mechanical Fastening of Heat Exchange Bimetallic Tubes in Energy Apparatus]. Engineering & Automation Problems. 2017. № 3. P. 83-88 (in Russian).
- [7] Terekhov V.M., Kondratenko L.A. Matematicheskaya model' processa zakrepleniya teploobmennyyh trub posredstvom gidrorazdachi [Mathematical Model of the Process of Fixing the Heat Exchange Tubes by Means of Hydraulic Distribution]. Engineering technology. 2001. № 1. P. 55-57 (in Russian).
- [8] Kondratenko L.A., Terekhov V.M., Vinnikov V.S., Averin A.S. Tekhnologicheskie vozmozhnosti teploobmennyyh trub v operacii zakrepleniya [Technological Capabilities of Heat Exchange Tubes in the Operation of Fixing]. Engineering technology. 2014. № 7. P. 28-33 (in Russian).
- [9] Smirnov A.M., Mironova L.I., Terekhov V.M., Kondratenko L.A. Issledovanie sostoyaniya poverhnostnogo sloya teploobmennyyh trub iz vysokolegirovannyh stalej austenitnogo klassa [Investigation of the State of the Surface Layer of Heat Exchange Tubes of High-Alloyed Austenitic Steels]. Proceedings of the St. Moscow IMASH RAN. Moscow IMASH RAN. 2018. Vol. 1. P. 814-818 (in Russian).
- [10] Smirnov A.M., Terekhov V.M., Averin A.S. Osobennosti tekhnologii razdachi teploobmennyyh trub dostatochnoj tolshchiny i ocenka kachestva pressovyh soedinenij [Features of Technology of Radial Deformation of Heat-Exchanging Pipes of Sufficient Thickness and Assessment of Quality of Press Connections]. Engineering & Automation Problems. 2019. № 1. P. 150-155 (in Russian).

Study of the Impact of Hydraulic Rolling Technology on the Condition of Press Connections

A.M. Smirnov^{*1}, V.V. Shishov^{**2}

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

e-mail: v.terehov@eatom.ru

***Experienced Design Office «GIDROPRESS», Ordzhonikidze st., 21, Podol'sk, Russia 142103*

² e-mail: v.shishov@eatom.ru

Abstract – The problem of the failure of steam generator collectors is actualized and its causes are revealed, one of which is the use of irrational technological processes of fixing heat exchanging pipes to tube sheets. The results of the study of the hydraulic rolling technology influence on the state of press joints are given which allowed to analyze the existing technology and determine reliable criteria to assess the quality of the pipe-tube-board connections.

Keywords: press connection, heat exchange tubes, collector, hydraulic rolling, clearance, tension.

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

УДК 621.039

**МЕТОДИКА ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ
ПРОДОЛЬНО-ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ СЕПАРАТОРОВ –
ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ ДЛЯ АЭС С ВОДО-ВОДЯНЫМИ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ РЕАКТОРАМИ**

© 2019 М. Ю. Хижов

АО Опытное конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС», Подольск, Россия

Предложена методика и конструкция стенда, позволившие провести теплогидравлические испытания продольно-оребранных труб сепараторов-пароперегревателей для АЭС с водоводяными энергетическими реакторами повышенной эффективности. По результатам проведенных испытаний продольно-оребранных труб с количеством П-образных ребер, равных шести и восьми, проведен сравнительный анализ. Показано, что для таких конструкций увеличение поверхности теплообмена превышает снижение коэффициента теплоотдачи

Ключевые слова: теплообменные трубы, сепаратор-пароперегреватель, теплогидравлические испытания, коэффициент теплоотдачи, поверхность теплообмена.

Поступила в редакцию 23.04.2019

После доработки 27.05.2019

Принята к публикации 31.05.2019

За короткий исторический промежуток времени ядерная энергетика стала частью мирового энергетического баланса. При этом с каждым годом доля атомных электростанций в мировом производстве электроэнергии возрастает. В ближайшие 8-10 лет будут введены в эксплуатацию новые АЭС: «Ханхикиви» (Финляндия), «Аккую» (Турция), «Эль-Дабаа» (Египет), «Руппур» (Бангладеш) и др. Новые перспективные проекты АЭС ориентированы на увеличение мощности, как единичных агрегатов, так и мощности энергоблоков в целом, что возможно как за счет проектирования и строительства новых, так и модернизации отдельных агрегатов в цепочке АЭС, при этом важная роль отводится увеличению их надежности и ресурса. Одним из узких звеньев в цепочке АЭС с ВВЭР-1200 (проект АЭС-2006) является сепаратор-пароперегреватель (СПП), предусматривающий применение теплообменных труб, включая матричную трубу с приваренными на нее продольными П-образными ребрами в количестве шести штук.

В работе [1] изложен метод оценки качества приварки П-образных ребер к матричной трубе, который может быть использован в производстве аппаратов СПП для ВВЭР-1200. Это технологический аспект обеспечения качества, а значит и прочностной надежности данных агрегатов. Изложим проблему касаясь конструктивного исполнения сепаратора-пароперегревателя, позволяющего повысить коэффициент теплоотдачи и, соответственно, эффективность аппарата. Известно, что для увеличения надежности и ресурса турбины необходимо повысить температуру пара, выдаваемого СПП. Самым простым решением было бы увеличить длину кассет, что несет за собой

ряд проблем, главная из которых – увеличение габаритов аппарата, что, соответственно, усложнит их транспортировку и монтаж. Кроме этого, увеличение длины пролета теплообменных труб приводит к значительным динамическим явлениям, поскольку теплообменные процессы в аппаратах сопровождаются колебаниями нагрузки и температуры, выпадением осадка. На трубы в поперечном и осевом направлениях действуют переменные силы. Сочетание колебаний силовых факторов, наличие или образование между контактирующими поверхностями щелей, в которые проникает осадок, либо приводит к щелевой коррозии с последующей разгерметизацией теплообменных контуров, либо к быстрой потере плотности и прочности узла крепления труб [2, 3]. Поэтому техническое решение об увеличении теплообменной поверхности путем увеличения количества ребер является наиболее технологичным и экономичным.

В данной работе проведена методика сравнительных теплогидравлических испытаний продольно-оребрённых труб СПП с количеством П-образных ребер, равных шести и восьми.

В таблице 1 и на рисунке 1 представлены геометрические параметры моделей труб с шестью и восемью ребрами, на рисунке 1 показаны их поперечные сечения. Основными отличиями конструкции трубы с восемью ребрами является их больший диаметр по оребрённой части – 33,54 мм, большая высота ребра – 8,8 мм, меньший угол раскрытия двойного ребра $22^{\circ}30'$ и меньший шаг приварки двойных (П-образных) ребер на несущую (матричную) трубу – 1,72 мм.

Таблица 1 – Геометрические параметры моделей труб с шестью и восемью двойными П-образными рёбрами [Geometric parameters of pipe models with six and eight double U-shaped edges]

№ п/п	Характеристики труб	Буквенные обозначения характеристик	Величина	
			Труба из шести рёбер	Труба из восьми рёбер
1	Длина трубы модели, мм	l	4710	4710
2	Длина оребрённой части, мм	l_p	3900	3900
3	Количество одиночных рёбер	n	12	16
4	Высота ребра, мм	$h_{реб}$	8,5	8,8
5	Толщина ребра, мм	δ	0,8	0,8
6	Развёрнутая длина корыта, образованного двумя рёбрами, мм	$l_{кор}$	20	20
7	Диаметр по вершинам рёбер, мм	d_p	33	34
8	Отношение поверхности рёбер H_p к полной поверхности $H_{п}$	$H_p/H_{п}$	0,793	0,84
9	Отношение поверхности, не занятой рёбрами, к полной поверхности	$H_{тр}/H_{п}$	0,207	0,16
10	Коэффициент оребрения, $H_{п}/H_{тр}$	φ	4,84	6,259
11	Живое сечение для прохода воздуха, m^2	$f_{воз}$	$1,155 \times 10^{-3}$	$1,123 \times 10^{-3}$

Продолжение таблицы 1

№ п/п	Характеристики труб	Буквенные обозначения характеристик	Величина	
			Труба из шести рёбер	Труба из восьми рёбер
12	Живое сечение для прохода воды, м ²	$f_{\text{вод}}$	$1,131 \times 10^{-4}$	$1,131 \times 10^{-4}$
13	Эквивалентный гидравлический диаметр модели, мм	$d_{\text{эм}}$	12,08	9,889
14	Полная поверхность оребрённой трубы, м ²	$F_{\text{ор.тр.}}$	1,07	1,482

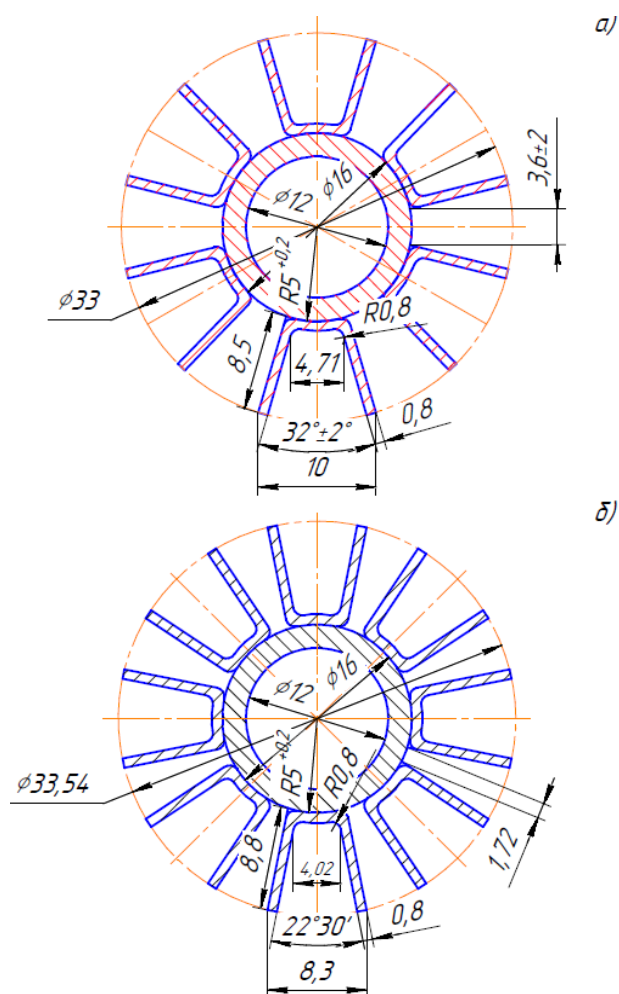


Рисунок 1 – Поперечное сечение теплообменных труб: а) с шестью двойными П-образными ребрами; б) с восьмью двойными П-образными ребрами [Cross section of heat exchange tubes: a) with six double U-shaped ribs; b) with eight double U-shaped ribs]

Из приведенных данных следует, что увеличение площади поверхности ребер пропорционально произведению отношения высот ребер и числа ребер и соответствует 1,38.

Теплоотдача продольно обтекаемых пучков из труб с продольными ребрами при $Re=2 \times 10^3 \div 2 \times 10^5$ и равномерном заполнении сечения теплообменными трубами описывается формулой [4]:

$$Nu = 0,332 Re^{0,75} Pr^{0,33} \left(0,2 + \frac{1}{1 + 0,167 h_p / b_2^3} \right), \quad (1)$$

где Nu – величина критерия Нуссельта нагреваемого пара; Re – величина критерия Рейнольдса нагреваемого пара; Pr – величина критерия Прандтля нагреваемого пара;

h_p – высота ребра, м; b_2 – ширина зазора между вершинами ребер, м.

Ширину зазора между вершинами ребер определим по формуле (2):

$$b_2 = \frac{\pi D_p}{n_p} - \delta_2, \quad (2)$$

где D_p – диаметр оребренной части, м; n_p – количество единичных ребер; δ_2 – толщина ребер у вершины, м.

Расчеты по формулам (1) и (2) показали, что для трубы с 6 двойными (12 единичными) ребрами зависимость (1) имеет вид формулы (3):

$$Nu_6 = 0,034 Re^{0,75} Pr^{0,33}. \quad (3)$$

Для трубы с 8 двойными (16 единичными) ребрами имеем, формулы (4):

$$Nu_8 = 0,0239 Re^{0,75} Pr^{0,33}. \quad (4)$$

Эквивалентный гидравлический диаметр трубного пучка пароперегревателя СПП-1000-1 с 12 единичными ребрами равен $d_{r6} = 13,31$ мм, с 16 единичными ребрами $d_{r8} = 10,05$ мм [5]. В этом случае имеем следующее соотношение коэффициентов теплоотдачи, формула (5):

$$\frac{\alpha_6}{\alpha_8} = \frac{Nu_6}{Nu_8} \frac{d_{r8}}{d_6} = 1,074. \quad (5)$$

Следовательно, увеличение поверхности теплообмена в 1,38 раза превышает снижение коэффициента теплоотдачи α_8 в 1,074 раз при равных числах Re и Pr .

Идеология сравнительных испытаний труб с 6 и 8 двойными ребрами изложена в отчете о НИОКР [5]. Сравнение результатов экспериментов должно проходить при одинаковых расходах воздуха, моделирующего нагреваемый пар, поскольку у труб разные эквивалентные гидравлические диаметры. Эксперименты предполагалось проводить на единичных оребренных трубах натурных размеров, расположенных внутри цилиндрической трубы. При тепловых испытаниях в трубу греющего пара подавалась горячая вода, в канал нагреваемого пара – воздух. Внутренний диаметр цилиндрической технологической трубы подбирался из максимального приближения эквивалентного гидравлического диаметра модели к эквивалентному гидравлическому диаметру натурального аппарата.

В таблице 2 приведены технические характеристики использованных приборов. По расчетам, приведенным в таблице 2 [5], для трубы $\varnothing 57 \times 7$ мм отличия вышеупомянутых диаметров для трубы с 6 двойными ребрами на 9,2% меньше натурального, для трубы с 8 двойными ребрами – на 1,6% так же меньше натурального. По

расчетам, приведённым в таблице 3 [5], число Рейнольдса трубного пучка натурного пароперегревателя СПП на номинальном режиме $Re = 28000$.

Таблица 2 – Измерительные приборы стенда теплогидравлических испытаний продольного оребрения трубы [Measuring instruments for the stand of thermohydraulic testing of pipe longitudinal finning]

№ п.п.	Обозначение на схеме	Наименование измерения	Название прибора	Марка прибора	Диапазон измерений	Предел относительной / абсолютной погрешности измерений
1	$P_{бар}$	Атмосферное давление	Преобразователь абсолютного давления	АИР-30ДА, модель ТА8	$10 \div 110$ кПа	0,2%
2	$P_{стш}$	Давление сжатого воздуха перед измерительной диафрагмой	Манометр	ОБМВ-140	$0 \div 4$ атм	1,5%
3	$\Delta P_{ш}$	Перепад давления сжатого воздуха на измерительной диафрагме	Преобразователь дифференциального давления	АИР-30ДД, модель CD4	$0 \div 10$ кПа	0,2%
4	Поз.4	Расход сжатого воздуха	Измерительная диафрагма	$D_{отв} = 35$ мм	$C_{ид} = 0,03$ кг/(м ² ·с)	
5	$t_{ш},$ $t_{вх\text{ возд}},$ $t_{ср\text{ возд}},$ $t_{вых\text{ возд}}$	Температура сжатого воздуха на измерительной диафрагме, на входе, в середине и на выходе из трубы	Термопреобразователь сопротивления	ТСПУ 0104 Pt 100	$0 \div 100^\circ\text{C}$	$\pm 0,35^\circ\text{C}$
6	$t_{вх\text{ вод}},$ $t_{вых\text{ вод}}$	Температура воды на входе и выходе из трубы технологической	Термопреобразователь сопротивления	ТСПУ 0104 Pt 100	$0 \div 100^\circ\text{C}$	$\pm 0,35^\circ\text{C}$
7	$t_{бак}$	Температура воды в баке - барботёре	Термометр контактный	ТК5-06	$-99 \div 1300^\circ\text{C}$	$\pm 0,5^\circ\text{C}$
8	$P_{вх\text{ возд}}$	Давление сжатого воздуха на входе трубы технологической	Манометр	МП4-У	$0 \div 1$ ати	1,5%
9	$Q_{вод}$	Объёмный расход воды	Расходомер электромагнитный	МЕТРАН-370 Ду15	$0,06 \div 1,792$ л/с	0,5%

Однако существенным недостатком такой схемы испытаний является наличие шунтирующего потока воздуха между внутренней поверхностью цилиндрической технологической трубы и вершинами ребер. Для трубы $\varnothing 57 \times 7$ мм расчетная ширина шунта равна 5 мм для трубы с 6 двойными ребрами и 4,5 мм с 8 двойными ребрами. Для теплообменной трубы с 6 двойными ребрами площадь поперечного сечения шунта составляет 52,2% от площади сечения для прохода воздуха, а для трубы с 8 двойными ребрами – 51,5%.

Поскольку поток воздуха через шунт на оребренном участке идет практически без теплообмена с поверхностью испытуемой трубы [6, 7, 8], эксперименты носят только сравнительный характер.

Схема модели для испытания представлена на рисунке 2. Схема течения воздуха и воды – противоток.

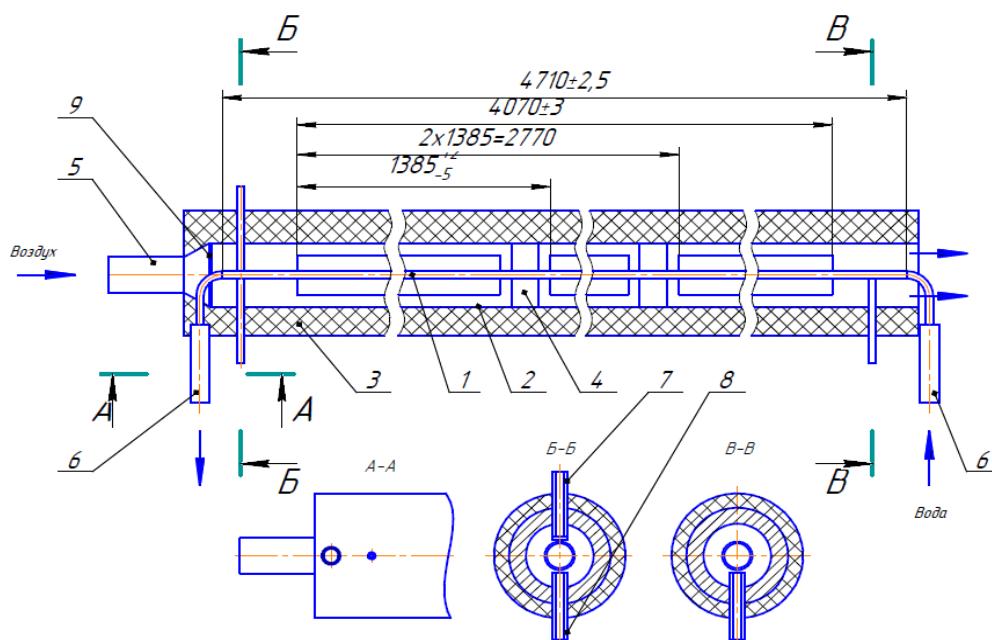


Рисунок 2 – Модель для теплогидравлических испытаний теплообменных труб: 1 – труба испытуемая; 2 – труба наружная технологическая; 3 – теплоизоляция; 4 – технологические проставки; 5 – штуцер воздуха; 6 – штуцер воды; 7 – штуцер датчика давления; 9 – входная шайба воздуха [Model for heat-hydraulic testing of heat exchange tubes: 1 – test tube; 2 – external technological pipe; 3 – heat insulation; 4 – technological spacers; 5 – air fitting; 6 – water fitting; 7 – pressure sensor fitting; 9 – air inlet washer]

На рисунке 3 приведена схема стенда и схема измерений теплофизических испытаний оребренных труб. Сжатый воздух из заводской магистрали, очищенный и осушенный в сепараторе 3, через измерительную диафрагму 4 подается в испытуемую трубу 1, размещённую в цилиндрической технологической трубе 2, и проходит по оребренной ее части и выхлопывается в атмосферу. Вода, нагретая в баке – барботере 5 паром от заводской магистрали, насосом К100-65-200 6 подается в трубу греющего пара и сливается из нее в бак 5. Труба 2 теплоизолирована.

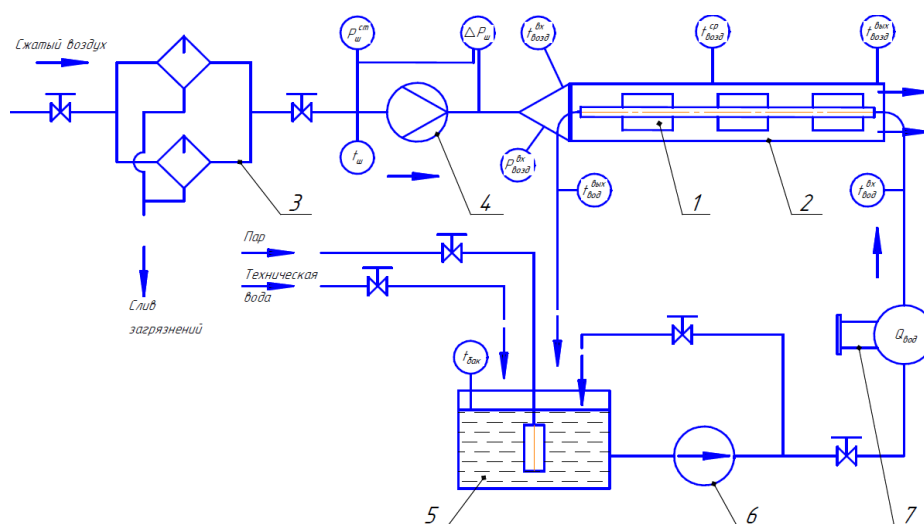


Рисунок 3 – Схема стенда и схема измерений теплогидравлических испытаний теплообменных труб: 1 – труба; 2 – труба технологическая наружная; 3 – сепаратор сжатого воздуха; 4 – измерительная диафрагма; 5 – бак-барбордер; 6 – насосный агрегат К100-65-200; 7 – электромагнитный расходомер «Метран-370» Ду15 [Stand scheme and measurement scheme of heat-hydraulic tests of heat exchange pipes: 1 – pipe; 2 – external technological pipe; 3 – compressed air separator; 4 – measuring diaphragm; 5 – tank barbore; 6 – pump unit К100-65-200; 7 – «Metran-370» DN15 electromagnetic flow meter]

В процессе эксперимента измеряются с записью на персональный компьютер стенда:

- атмосферное давление $P_{\text{бар}}$;
- воздуха перед измерительной диафрагмой $t_{\text{ш}}$;
- перепад давления на измерительной диафрагме $\Delta P_{\text{ш}}$;
- температура воздуха на входе в оребрение трубы $t_{\text{возд}}^{\text{ВХ}}$;
- температура воздуха в середине оребренной трубы $t_{\text{возд}}^{\text{СР}}$ (факультативно);
- температура воздуха на выходе из оребрения трубы $t_{\text{возд}}^{\text{ВЫХ}}$;
- температура воды на входе в трубу греющего пара $t_{\text{вод}}^{\text{ВХ}}$;
- температура воды на выходе из трубы греющего пара $t_{\text{вод}}^{\text{ВЫХ}}$;
- объемный расход горячей воды $Q_{\text{вод}}$.

С записью в ручном режиме измерялись:

- давление воздуха перед измерительной диафрагмой $P_{\text{ш}}^{\text{СТ}}$;
- давление воздуха на входе в оребрение трубы $P_{\text{возд}}^{\text{ВХ}}$;
- температура воды в баке – барботере $t_{\text{бак}}$.

Эксперимент проводился следующим образом. Вода в баке – барботере нагревалась паром до $\approx 75\div 85^\circ\text{C}$ (больше нельзя по правилам эксплуатации насосного агрегата К100-65-200) и удерживалась на выбранном уровне. Затем запускался насосный агрегат, и подавался расход воды от 0,080 л/с до 0,13 л/с и удерживался на выбранном уровне. Столь небольшой расход греющего теплоносителя требовался для увеличения разности температур его на входе и выходе из испытуемой трубы для повышения точности расчета баланса тепла.

Далее подавался требуемый расход воздуха. Для этого на манометре, измеряющем давление перед измерительной диафрагмой $P_{\text{ш}}^{\text{СТ}}$, выставлялось давление от 0,75 ати до 3,75 ати. Фактический расход воздуха в автоматическом режиме вычислял персональный компьютер стенда. Баланс тепла производился так же расчетом на компьютере стенда. По достижении небаланса $\leq 5\%$ производилась запись показаний приборов на компьютере стенда и бумажный протокол испытаний.

Предложенная методика позволила эффективно осуществить теплогидравлические испытания продольно-оребрённых труб сепараторов-пароперегревателей для АЭС с водоводяными энергетическими реакторами повышенной эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Смирнов, А.М.* Оценка качества оребренных теплообменных труб сепаратора-пароперегревателя [Текст] / М.Ю. Хижов, В.И. Лексиков // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2018. – № 4. – С. 135-141.
2. *Кондратенко, Л.А.* К вопросу о влиянии динамики роликового вальцевания на качество изготовления теплообменных аппаратов в атомных энергетических установках [Текст] / Л.А. Кондратенко, В.М. Терехов, Л.И. Миронова // Тяжелое машиностроение. – 2016. – № 10. – С. 10-14.
3. *Смирнов, А.М.* Особенности технологии раздачи теплообменных труб достаточной толщины и оценка качества прессовых соединений [Текст] / А.М. Смирнов, В.М. Терехов, А.С. Аверин // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2019. – № 1. – С. 150-155.
4. Отчет НИОКР №ЭЦР-0613. Теплогидравлические испытания продольно-оребрённых труб пароперегревателя СПП-1000-1 [Текст]. – Подольск : ПАО «ЗиО-Подольск», 2017 – 51 с.
5. *Аверьянов, И.Д.* Экспериментальные исследования теплообмена и аэродинамики штатной кассеты из ребристых труб сепаратора-пароперегревателя СПП-220М [Текст] / А.И. Бакин, В.В. Богданов, В.К. Буров. – Отчет НИОКР №ФР 00698. – Подольск : «ЗиО-Подольск», 1977. – 74 с.
6. *Горобец, В.Г.* Сравнительный анализ теплоотдачи и гидравлического сопротивления пучков труб с оребрением разменного типа [Текст] / сб. трудов IV Российской национальной конф. по теплообмену. – Москва : Московский энергетический институт, 2006. – С. 182-186.

7. Сепараторы – пароперегреватели турбин АЭС. Расчет и проектирование. РТМ 108.020.107-84 [Текст]. – Ленинград : ЦКТИ, 1986. – 15 с.
8. Легкоступова, В.В. Расчетное обоснование модернизации сепараторов-пароперегревателей энергоблоков АЭС [Текст] : дисс. канд. техн. наук. – Санкт-Петербург : ОАО «НПО ЦКТИ», 2018. – 172 с.
9. Терехов, В.М. Технологические основы обеспечения качества глубоких отверстий и соединений теплообменных труб с трубными решетками и коллекторами аппаратов атомных энергоустановок: дис. докт. техн. наук [Текст] / В.М. Терехов. – Москва, 2006. – 476 с.
10. Кондратенко, Л.А. Расчетно-экспериментальные методы исследования технологических напряжений и деформаций в неразъемных трубных соединениях энергоустановок: автореф. докт. техн. наук [Текст] / Л.А. Кондратенко. – Москва, 2017. – 48 с.

REFERENCES

- [1] Smirnov A.M., Hizhov M.YU., Leksikov V.I. Ocenka kachestva orebrennyh teploobmennyyh trub separatora-paroperegrevatelya [Estimation of Quality of Heat Exchange Pipes with External Ribs for the Separator-Superheater]. Engineering & Automation Problems. 2018. №. 4. P. 135-141 (in Russian).
- [2] Kondratenko L.A., Terekhov V.M., Mironova L.I. K voprosu o vliyaniy dinamiki rolikovogo val'cevaniya na kachestvo izgotovleniya teploobmennyyh apparatov v atomnyh ehnergeticheskikh ustanovkakh [Effect of the Dynamics of the Rolling on the Quality of Manufacture of Heat Exchangers of Nuclear Power Units] Heavy engineering construction. 2016. № 3. P. 10-14 (in Russian).
- [3] Smirnov A.M., Terekhov V.M., Averin A.S. Osobennosti tekhnologii razdachi teploobmennyyh trub dostatochnoj tolshchiny i ocenka kachestva pressovyh soedinenij [Features of Radial Deformation Technology of Heat-Exchanging Pipes of Sufficient Thickness and Assessment of Quality of Press Connections]. Engineering & Automation Problems. 2019. №. 1. P. 150-155 (in Russian).
- [4] Otchyot NIOKR №EHCR-0613. Teplogidravlicheskie ispytaniya prodol'no-orebrennyh trub paroperegrevatelya SPP-1000-1 [Report NIOKR №EHCR-0613. Thermohydraulic Testing of Longitudinally Finned Tubes of the SPP-1000-1 Superheater]. Podol'sk. PAO «ZiO-Podol'sk». 2017. 51 p. (in Russian).
- [5] Aver'yanov I.D., Bakin A.I., Bogdanov V.V., Burov V.K. EHksperimental'nye issledovaniya teploobmena i aehrodinamiki shtatnoj kassety iz rebristyyh trub separatora-paroperegrevatelya SPP-220M. [Experimental Studies of Heat Transfer and Aerodynamics of a Standard Cassette Made of Finned Tubes of a SPP-220M Separator-Superheater] Otchyot NIOKR №FR 00698. Podol'sk. PAO «ZiO-Podol'sk». 2017. 74 p. (in Russian).
- [6] Gorobec V.G. Sravnitel'nyj analiz teplootdachi i gidravlicheskogo soprotivleniya puchkov trub s orebreniem razmennogo tipa [Comparative Analysis of Heat Transfer and Hydraulic Resistance of Bundles of Tubes with Barreled Fins]. Proceedings of the St. Moscow. Moscow Power Engineering Institute. 2006. P. 182-186 (in Russian).
- [7] Separatory – paroperegrevately turbin AEHS. Raschyot i proektirovanie. RTM 108.020.107-84 [Separators - Steam Superheaters of NPP Turbines. Calculation and Design. RTM 108.020.107-84]. Leningrad : CKTI. 1986. 15 p. (in Russian).
- [8] Legkostupova V.V. Raschyotnoe obosnovanie modernizacii separatorov-paroperegrevatelej ehnergoblokov AEHS : – diss. kand. tekhn. nauk. [Estimated Justification for the Modernization of Separators-Superheaters of NPP Power Units]. St. Petersburg. ОАО «НПО ЦКТИ». 2018. 172 p. (in Russian).
- [9] Terekhov V.M. Tekhnologicheskie osnovy obespecheniya kachestva glubokih otverstij i soedinenij teploobmennyyh trub s trubnymi reshetkami i kollektorami apparatov atomnyh ehnergoustanovok: dis. dokt. tekhn. nauk [Technological Basis for Quality Assurance of Deep Holes and Heat Exchanger Tube Connections with Tube Sheets and Collectors of Nuclear Power Plants. Thesis]. Moscow. 2006 (in Russian).
- [10] Kondratenko L.A. Raschetno-ehksperimental'nye metody issledovaniya tekhnologicheskikh napryazhenij i deformacij v neraz'emnyh trubnyh soedineniyah ehnergoustanovok: avtoref. dokt. tekhn. nauk [Computational and Experimental Methods for Studying Technological Stresses and Deformations in Permanent Pipe Joints of Power Plants: Thesis abstract]. Moscow. 2017 (in Russian).

Method of Heat-Hydraulic Tests of Long-Relined Pipes of Separator – Vapor Heaters for NPP with Water-Water Energy Reactors

M.YU. Khizhov

*ОА ОКБ «GIDROPRESS», Podol'sk, Russia
e-mail: grpress@grpress.podolsk.ru*

Abstract – The paper proposes methodology and design of the stand which allowed to conduct thermal tests of longitudinally-finned tubes of separators-superheaters for nuclear power plants with water-water power reactors of high efficiency. According to the results of tests of longitudinally ribbed pipes with the number of U-shaped ribs equal to six and eight, a comparative analysis is conducted. It is shown that the increase in heat transfer surface exceeds the decrease in heat transfer coefficient for such structures.

Keywords: heat exchange tubes, separator-superheater, thermal hydraulic tests, heat transfer coefficient, heat exchange surface.

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.311.25.004.7:658.8

**ВОЗМОЖНОСТИ ЛОГИСТИКИ В ОБЕСПЕЧЕНИИ
ЭФФЕКТИВНОСТИ И РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ВЫВОДА 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 применения логистики в проектировании и реализации производственного процесса вывода из эксплуатации блоков атомных электрических станций с целью повышения эффективности и безопасности проектных и практических решений по управлению материальными и сопутствующими им информационными потоками.

Ключевые слова: вывод из эксплуатации, блок атомной электрической станции, логистика, эффективность производственного процесса, радиационная безопасность.

Поступила в редакцию 30.04.2019

После доработки 16.05.2019

Принята к публикации 24.05.2019

Решение проблемы вывода из эксплуатации блоков атомных электрических станций (АЭС) в нашей стране переходит в практическую плоскость: уже разворачиваются работы на первой очереди Нововоронежской АЭС, интенсифицируется подготовка вывода из эксплуатации блоков первой очереди на Белоярской АЭС и далее – на останавливаемых после продления срока службы блоках Ленинградской, Кольской, Нововоронежской и Билибинской АЭС.

Как разработка проектов вывода из эксплуатации блоков АЭС, так и их реализация получают научно-исследовательскую, научно-практическую и нормативно-правовую поддержку в обосновании принимаемых организационно-управленческих, технических и технологических решений с обязательным условием их соответствия требованиям радиационной безопасности. Например, представляются сведения, соображения, требования и предложения, ценные для проблематики вывода из эксплуатации блоков АЭС в части производства демонтажных работ в соответствии:

- с нормативными, правовыми и концептуальными положениями, правилами, требованиями [1 – 5];
- с конструктивными и компоновочными решениями, примененными на блоках АЭС и влияющими на процесс вывода из эксплуатации [1 – 2, 3, 6];
- с радиационно-физическими факторами, определяющими специфику ведения демонтажных работ [1-7];
- с применяемыми методами и технологическими средствами дезактивации оборудования, зданий и сооружений [4-8];
- с возможностью применения промышленных и вновь разрабатываемых методов и технологических средств демонтажа оборудования, зданий и сооружений [1, 9-11];
- с условиями обеспечения радиационной безопасности [1-5, 7, 8];

- с технологией обращения с образующимися основными и вторичными отходами [1, 3, 4, 5, 10];
- с возможностью применения информационных технологий [1, 3, 6, 10, 11];
- с фактором обеспечения конкурентоспособности проектов демонтажных работ [11, 12].

Однако эффективность решений, принимаемых на основе этих соображений и предложений в увязке с имеющейся практикой вывода блоков АЭС из эксплуатации, может быть реальной только в условиях системного подхода к реализации процесса вывода из эксплуатации в целом. Такая систематизация в определенной мере может быть проведена в рамках логистического подхода, зарекомендовавшего себя в качестве современного инструмента управления в экономике, производстве, бизнесе [13, 14].

Представляют интерес вопросы адаптации процесса вывода из эксплуатации блока АЭС в логистические структуры и возможности поддержания его эффективности за счет использования правил, процедур и операций логистики. Эффективность оценивается экономическими показателями при безусловном обеспечении требований безопасности.

Каким образом можно представить производственный процесс вывода из эксплуатации, какие составляющие этого процесса должны быть встроены в логистику?

Рассматриваемый процесс попадает под понятие «производственный» по следующим признакам:

- задействованные в процессе вывода из эксплуатации объекты подвергаются технологическому переделу от начального состояния в виде подвергавшегося эксплуатации оборудования, металлоконструкций, строительных конструкций в конечное состояние в виде демонтированного оборудования и металлоконструкций, строительных элементов, крупных и мелких металлических и строительных фрагментов;
- в процессе вывода из эксплуатации генерируются вторичные отходы в виде радиоактивных отходов (РАО) от применения дезактивационных технологий;
- действуют материальные (транспортно-технологические) потоки в виде демонтированных объектов, направляемых из рабочих зон демонтажных работ в места временного складирования, на участки сортировки и переработки, на организованные площадки временного хранения, штатные и организованные хранилища длительного хранения, в региональные могильники (при наличии) для захоронения и на площадки складирования металлолома и строительных отходов;
- выполняются определенные требования по физическому состоянию и массогабаритным параметрам продукции (включая вторичные отходы), эти требования регламентируются нормативной документацией и в некоторой части условным потребителем (хранилищем отходов, могильником, металлургическим производством и др.);
- в транспортно-технологических потоках используется тара в виде транспортных и защитных контейнеров, поддонов, мягкой упаковки; часть продукции перемещается без укладки, навалом;
- процесс сопровождается информационным потоком, направленным как по ходу транспортно-технологического потока, так и обратно ему.

Имеются существенные отличия производственного процесса вывода из эксплуатации блоков АЭС от производства изделий в его обычном понимании:

- не используется производственная функция снабжения, нет закупок исходных материалов для производства изделий, т.е. отсутствует входной материалопоток в производственную систему;

– наблюдается смена приоритетов в оценке эффективности производства – экономические факторы в виде производительности и себестоимости работ идут вслед факторам их радиационной безопасности и обеспечения нормативных требований к продукции;

– в роли покупателя с его потребностями выступают организации, в том числе, эксплуатирующая блок АЭС, занимающиеся хранением и захоронением РАО, и организации-посредники, продающие отходы в виде металлолома;

– особое значение имеет учет транспортно-технологического материального потока радиоактивной продукции демонтажных работ, необходимо отслеживать объем этого потока, радиационное состояние объектов по ходу перемещения, их массогабаритные параметры;

– вспомогательное производство в виде участков переработки демонтированной радиоактивной продукции организационно и технологически сложное, сопоставимое или превосходящее по техническому уровню основное производство (демонтаж оборудования, металлоконструкций и строительных конструкций);

– в целом процесс вывода из эксплуатации находится в жестких по расположению и занимаемому пространству границах и ограниченному по длительности временному интервалу функционирования.

Чтобы понять возможности адаптации производственного процесса вывода блоков АЭС из эксплуатации в структуры и операции, присущие логистике, необходимо дать сжатое представление об этом сравнительно новом направлении в экономике с учетом представленных особенностей данного процесса как временно действующего и специфического по генерируемой продукции производства.

Прежде всего, в экономике под логистикой понимают научную и практическую деятельность, связанную с организацией, управлением и оптимизацией движения материальных и сопутствующих информационных потоков от источника сырья до потребителя [13, 14].

В процессе демонтажных работ в качестве источника сырья условно принимаются демонтируемые объекты и отсутствуют внешние сырьевые потоки.

Основные функциональные области логистики проявляются и в производственном процессе вывода блока АЭС из эксплуатации.

1. Транспортная логистика, управляющая материальными потоками, в полной мере отвечает условиям применения в транспортно-технологических потоках демонтируемых объектов на блоке АЭС.

2. Производственная логистика, в общем случае связанная с промышленным изготовлением продукции материального потребления и чаще всего функционирующая в пределах одного предприятия в рамках действующей в нем системы управления, в производственном процессе вывода из эксплуатации блока АЭС охватывает технологическую составляющую потока демонтируемых объектов при операциях демонтажа, переработки, кондиционирования.

3. Информационная логистика, базирующаяся на информационных технологиях и микропроцессорной технике, используется в процедурах управления во всех функциональных областях логистики, она поддержит необходимый уровень управления транспортно-технологическими потоками в производственном процессе вывода из эксплуатации блока АЭС и, кроме того, может быть использована для контроля движения радиоактивных демонтированных объектов.

4. Распределительная логистика, в общем случае решающая задачи реализации готовой продукции, в условиях производственного процесса вывода блока АЭС из эксплуатации будет функционировать в существенно отличающейся среде, особенности которой показаны выше.

Базисными функциями логистики в условиях рассматриваемого производственного процесса являются производство и частично сбыт, отсутствует такая базисная функция, как снабжение.

В качестве ключевых логистических функций следует выделить транспортировку и управление производственными процедурами. Присущая логистике ключевая функция поддержки стандартов обслуживания потребителей вытесняется нормативными требованиями к продукции демонтажных работ – радиоактивных отходам, материалам ограниченного и неограниченного применения. Другая ключевая функция – управление запасами выполняется ограниченно на стыке между демонтажными операциями и операциями переработки РАО, обеспечивая регулярность и темп выполнения последних.

В логистике процесс управления транспортировкой обычно предполагает принятие комплекса решений по выбору вида упаковки, транспорта, определению маршрутов и т.п. [13, 14]. В таком представлении данная ключевая функция логистики в целом соответствует производственному процессу вывода из эксплуатации блоков АЭС, однако необходимо учитывать влияние на данные решения фактора обеспечения радиационной безопасности.

Функция управления процедурами заказов в рассматриваемых в настоящей работе условиях действует факультативно и относится к сбыту материалов ограниченного и неограниченного применения и размещению РАО в региональных могильниках (в настоящее время отсутствующих).

С позиций логистики [13, 14] важность управления производственными процедурами (операционный менеджмент) в условиях вывода из эксплуатации блока АЭС заключается в наиболее эффективном (с точки зрения снижения затрат и обеспечения нормативных требований к продукции и радиационной безопасности) управлении потоками демонтируемых объектов в технологических процессах их демонтажа и последующей переработки. При этом большое значение имеют логистические задачи календарного планирования, минимизации уровня незавершенного производства, сокращения длительности производственного цикла и т.п. Задачи операционного менеджмента во многом решаются системами типа «оптимальные производственные технологии» и др.

Поддерживающие логистические функции в рассматриваемых условиях проявляются в виде операций и процедур [13, 14]:

- складирования;
- грузопереработки;
- защитной упаковки;
- информационно-компьютерной поддержки.

Складирование представляет собой функцию управления пространственным размещением объектов материалопотоков и предусматривает выполнение таких задач, как:

- определение числа, типа и дислокации складов (в широкой трактовке понятия);
- объема (площади) хранения продукции в промежуточном и готовом виде;
- проектирования зон транспортировки, сортировки, погрузки-разгрузки;
- выбор погрузочно-разгрузочного и другого складского оборудования и т.п.

Данная функция в полной мере соответствует производственному процессу вывода из эксплуатации блока АЭС.

Грузопереработка (обработка грузов) включает логистические операции перемещения промежуточной и (или) готовой продукции на складе, для чего проводится выбор соответствующего транспортного и погрузочно-разгрузочного оборудования, эти операции совмещаются с процедурами сортировки,

кондиционирования или комплектования грузов для выполнения последующей технологической переработки или подготовки к распределению между потребителями. Однако в условиях рассматриваемого производственного процесса масштабы реализации данной функции ограничены.

Особая роль в производственных условиях процесса вывода из эксплуатации принадлежит процедурам защитной упаковки, обеспечивающей радиационную безопасность обращения с РАО. В традиционных условиях защитная упаковка обеспечивает сохранность грузов, доставляемых потребителям различными видами транспорта. Применение стандартных типоразмерных рядов тары и упаковки позволяет значительно снизить логистические издержки за счет согласования с их массогабаритными параметрами технических характеристик транспортных средств, а также технологических параметров складских помещений и грузоперерабатывающего оборудования. Данные соображения остаются справедливыми и для рассматриваемых в настоящей работе условий, при этом первостепенное значение имеют радиационно-защитные характеристики упаковки РАО.

Как и в общепромышленных процессах производства и сбыта готовой продукции, когда возникают, так называемые, вторичные материальные ресурсы, состоящие из отходов производства (возвратных и невозвратных) и отходов производственного и личного потребления, в производственных условиях вывода блока АЭС из эксплуатации генерируются вторичные РАО в виде шлаков и шламов от дезактивационных операций и фильтров системы спецвентиляции.

Вторичные материальные ресурсы образуют специфические материальные потоки, управление которыми в настоящее время также можно отнести к объекту исследования логистики.

Современные логистические системы функционируют в условиях информационно-компьютерной поддержки процедур обращения с информацией по материальным и финансовым потокам, они позволяют внедрить автоматизацию документооборота, расширить возможности планирования, организации, регулирования, учета, контроля и анализа материальных потоков [13, 14].

Объем материального потока производственного процесса вывода из эксплуатации блока АЭС в существенно большей части состоит из демонтированных объектов, не имеющих радиоактивного загрязнения, и может регулироваться и организовываться в рамках уже ставших тривиальными операций и процедур логистики. Особый подход потребует в применении логистики к материальным потокам радиоактивно загрязненных объектов демонтажа, объем которых может составлять тысячи тонн.

В этом случае логистические операции и процедуры должны быть более развитыми в части использования результатов контроля меняющихся в ходе производственного процесса радиационных и массогабаритных параметров демонтированных объектов, их объема и количества, распределения по категориям активности. Полученные сведения важны не только для принятия логистических решений, но и для учета движения радиоактивных объектов (по количественным и качественным характеристикам) в производственном процессе. Таким образом, выделяется информационная функция логистического подхода, которая будет способствовать соблюдению требований радиационной безопасности выполняемых в производственном процессе работ.

Очевидно, что логистические процедуры и операции такого рода должны функционировать при соответствующей информационно-компьютерной поддержке с применением дистанционного контроля и современных способов маркировки объектов контроля. Определенную помощь в этом направлении может оказать использование

мерной упаковочной тары, заполняемой сортированными по категориям активности объектами демонтажных работ.

Поступательное развитие научных и научно-практических исследований в проблематике вывода из эксплуатации блоков АЭС может быть эффективно дополнено привлечением современного аппарата логистики – научной и практической деятельности, связанной с организацией и управлением движением материальных и сопутствующих им информационных потоков. Целесообразно использование информационной функции логистики в учете движения демонтированных радиационно-активных объектов, контроль которых в производственном процессе вывода из эксплуатации – обязательное условие обеспечения требований радиационной безопасности работ. Следует рекомендовать включение логистики в проектную документацию вывода из эксплуатации блоков АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Берела, А. И.* Разработка технологических процессов демонтажа оборудования при выводе из эксплуатации атомных станций [Электронный ресурс] / 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: 20.03.2019).
2. *Томилин, С.А.* Особенности проектирования демонтажа оборудования блоков атомных станций с учетом нормативного регулирования их вывода из эксплуатации [Текст] / С.А. Томилин, А.И. Берела, Н.Н. Подрезов, А.Г. Федотов // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. № 1 (22). – С. 59-67.
3. *Берела, А.И.* Постановка задач проектирования технологических процессов демонтажа основного оборудования при выводе из эксплуатации блоков АЭС с корпусными реакторами [Текст] / А.И. Берела, С.А. Томилин, А.Г. Федотов // В сборнике трудов научно-практической конференции БИТИ НИЯУ МИФИ : «Энергоэффективность и энергосбережение» – 2016. – С. 8-11.
4. СП 2.6.1.2205-07. Санитарные правила «Обеспечение радиационной безопасности при выводе из эксплуатации блока атомной станции». – Москва, 2007.
5. 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.
6. *Берела, А.И.* Анализ и представление среды действия в системе проектирования технологии демонтажа оборудования при выводе из эксплуатации блока АЭС [Текст] / А.И. Берела, Б.К. Былкин, С.А. Томилин, А.Г. Федотов // Глобальная ядерная безопасность. – 2014. – № 1 (10). – С. 25-31.
7. *Берела, А.И.* Адаптация технологии демонтажа оборудования выводимых из эксплуатации блоков АЭС к требованиям радиационной безопасности [Электронный ресурс] / 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: 20.03.2019).
8. *Берела, А.И.* Реализация процедур обеспечения радиационной безопасности в технологических процессах демонтажа оборудования при выводе блоков АЭС из эксплуатации [Электронный ресурс] / А.И. Берела, С.А. Томилин, А.Г. Федотов // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 1 (33). – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2766 (дата обращения: 12.02.2019).
9. *Берела, А.И.* Технологическое оборудование, применяемое в работах по выводу из эксплуатации блоков АЭС [Текст] / А.И. Берела, А.Г. Федотов, С.А. Томилин // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – № 1 (6). – С. 58-66.
10. *Берела, А.И.* Выбор значений параметров технологического процесса демонтажа оборудования блоков АЭС, выводимых из эксплуатации [Текст] / А. И. Берела, Б. К. Былкин, С.А. Томилин, А.Г. Федотов // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – № 3 (8). – С. 60-64.
11. *Берела, А.И.* Оптимизационные аспекты проектирования технологического процесса демонтажа оборудования при выводе из эксплуатации блока атомной станции [Текст] / А.И. Берела, Б.К. Былкин, В.А. Шапошников // Тяжелое машиностроение. – 2004. – № 6. – С. 9-14.
12. *Берела, А.И.* Основные принципы разработки конкурентоспособных проектов демонтажных работ при выводе из эксплуатации блоков атомных станций [Текст] /

- А. И. Берела, С.А. Томилин, А.Г. Федотов // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2015. – Т.5. – № 4 (26). – С. 191-195.
13. Гаджинский, А.М. Логистика: Учеб. [Текст] А.М. Гаджинский. – Москва : Издательско-торговая корпорация «Дашков и К^о», 2009. – 484 с.
 14. Иванов, Ю.М. Логистика [Текст] / М.Ю. Иванов, М.Б. Иванова. – Москва : РИОР, 2006. – 91 с.

REFERENCES

- [1] Berela A.I., Fedotov A.G., Tomilin S.A., Bylkin B.K. Razrabotka texnologicheskix processov demontazha oborudovaniya pri vyvode iz e'kspluatsii 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/magazine/archive/n2y2013/1734 (in Russian).
- [2] 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 vyvoda iz e'kspluatsii [Features of the Design of Dismantling the Equipment of Nuclear Power Units, Taking into Account the Regulation of their Decommissioning]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2017. № 1(22). P. 59-67 (in Russian).
- [3] Berela A.I., Tomilin S.A., Fedotov A.G. Postanovka zadach proektirovaniya texnologicheskix processov demontazha osnovnogo oborudovaniya pri vyvode iz e'kspluatsii blokov AE'S s korpusny'mi reaktorami [Setting the Tasks of Designing Technological Processes for Dismantling the Main Equipment during Decommissioning of NPP Units with Tank Reactors]. V sbornike trudov nauchno-prakticheskoy konferencii BITI NIYaU MIFI: «E'nergoe'ffektivnost' i e'nergoberezhenie» [Energy Efficiency and Energy Saving]. 2016. P. 8-11 (in Russian).
- [4] SP 2.6.1.2205-07. Sanitarny'e pravila «Obespechenie radiacionnoj bezopasnosti pri vyvode iz e'kspluatsii bloka atomnoj stancii» [Sanitary rules «Ensuring radiation safety during decommissioning of a nuclear power plant unit»]. Moscow. 2007 (in Russian).
- [5] NP-012-16. Federal'ny'e normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj e'nergii «Pravila obespecheniya bezopasnosti pri vyvode iz e'kspluatsii bloka atomnoj stancii» [Federal Rules and Regulations in the Field of Atomic Energy Use «Rules for Ensuring Safety during Decommissioning of a 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).
- [6] Berela A.I., Bylkin B.K., Tomilin S.A., Fedotov A.G. Analiz i predstavlenie sredy` dejstviya v sisteme proektirovaniya texnologii demontazha oborudovaniya pri vyvode iz e'kspluatsii bloka AE'S [Analysis and Representation of the Environment of Action in the Design System of Equipment Dismantling Equipment during Decommissioning of the NPP Unit]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2014. № 1(10). P. 25-31 (in Russian).
- [7] Berela A.I., Bylkin B.K., Tomilin S.A., Fedotov A.G. Adaptaciya texnologii demontazha oborudovaniya vyvodimy'x iz e'kspluatsii 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).
- [8] Berela A.I., Tomilin S.A., Fedotov A.G. Realizaciya procedur obespecheniya radiacionnoj bezopasnosti v texnologicheskix processax demontazha oborudovaniya pri vyvode blokov AE'S iz e'kspluatsii [Implementation of Procedures for Ensuring Radiation Safety in Technological Processes of Dismantling Equipment when Decommissioning NPP Units]. Inzhenerny'j vestnik Dona [Engineering Herald of the Don] (in Russian).
- [9] Berela A.I., Fedotov A.G., Tomilin S.A. Texnologicheskoe oborudovanie, primenyaemoe v rabotax po vyvodu iz e'kspluatsii 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).
- [10] Berela A.I., Bylkin B.K., Tomilin S.A., Fedotov A.G. Vybor znachenij parametrov texnologicheskogo processa demontazha oborudovaniya blokov AE'S, vyvodimy'x iz e'kspluatsii [The Choice of the Values of the Parameters of the Technological Process of Dismantling the Equipment of NPP Units Decommissioned]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2013. № 3(8). P. 60-64 (in Russian).
- [11] Berela A.I., Bylkin B.K., Shaposhnikov V.A. Optimizacionny'e aspekty` proektirovaniya texnologicheskogo processa demontazha oborudovaniya pri vyvode iz e'kspluatsii bloka atomnoj

- stancii [Optimization Aspects of the Design Process of Dismantling Equipment during Decommissioning of a Nuclear Power Plant Unit]. Tyazheloe mashinostroenie [Heavy Engineering]. 2004. №6. P. 9-14 (in Russian).
- [12] 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. T.5. № 4 (26). P. 191-195 (in Russian).
- [13] Gadzhinskij, A.M. Logistika: Ucheb. [Logistics: Textbook]. Moscow : Izdatel'sko-torgovaya korporaciya «Dashkov i K°» [Dashkov and K° Publishing and Trade Corporation]. 2009. 484 p. (in Russian).
- [14] Ivanov M.Yu., Ivanova. Logistika: Ucheb. posobie [Logistics: Textbook manual]. Moscow : RIOR (in Russian).

Possibilities of Logistics in Ensuring Efficiency and Radiation Safety of Production Process of Nuclear Power Stations 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 paper considers the possibilities of applying logistics in the design and implementation of the decommissioning process of nuclear power plant units to improve the efficiency and safety of design and practical solutions for managing material and information flows.

Keywords: decommissioning, nuclear power plant unit, logistics, production process efficiency, radiation safety.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.039.516.2:621.039.514.45:621.039.566

ИНТЕРАКТИВНЫЙ АЛЬБОМ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВНОЙ ЗАГРУЗКИ РЕАКТОРОВ ВВЭР

© 2019 А.А. Лапкис, В.А. Игнаткин, М.А. Коломиец

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

В статье описаны метод и разработанное авторами программное средство для автоматизации оперативных расчётов изменения реактивности реактора ВВЭР-1000. Приведены основные расчётные зависимости, экранные формы и результаты тестирования. Оценено снижение погрешности расчётов. Предложен путь развития разработанного программного средства как элемента цифрового двойника ядерного реактора ВВЭР-1000.

Ключевые слова: ВВЭР-1000, реактивность, топливная загрузка, эффекты реактивности, коэффициенты реактивности, ПС СУЗ, ОР СУЗ, нейтронно-физические характеристики.

Поступила в редакцию 27.05.2019

После доработки 03.06.2019

Принята к публикации 06.06.2019

ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Изменения состояния реакторной установки, связанные с введением реактивности, представляют особую опасность ввиду существования возможности разгона на мгновенных нейтронах при введении реактивности, величина которой превышает эффективную долю запаздывающих нейтронов.

Это обуславливает необходимость формирования у оперативного персонала реакторного цеха (РЦ) чёткого представления о конечном состоянии реакторной установки (РУ). Такое представление обеспечивается:

- компетентностью персонала, включающей опыт эксплуатации [1, 2];
- путём оперативного расчёта изменения реактивности в результате управляющего воздействия.

Методики оперативного расчёта изменения реактивности известны [3], а на Ростовской АЭС предписаны эксплуатационной документацией на реактор - альбом нейтронно-физических характеристик (НФХ). Однако отсутствие в указанном типе документов [4] пошаговых методик расчёта в обоснование воздействий на реактивность с учётом ксеноновых процессов ограничивает полноту представления о переходном процессе.

Выполнение расчётов вручную занимает некоторое время – около 5-10 минут в условиях отсутствия отвлекающих факторов, редко достижимых при работе смены блочного щита управления (БЩУ) – и отвлекает внимание оперативного персонала БЩУ от текущего технологического процесса. Кроме того, результаты ручного счёта, как правило, обнаруживают существенную погрешность.

Указанные проблемы могут быть отчасти нивелированы путем использования нейтронно-физических кодов, применяемых при расчёте НФХ каждой топливной загрузки реакторов ВВЭР-1000. Однако это потребовало бы наличия у оперативного персонала компетенций, соответствующих более специалистам отделов ядерной

безопасности и надёжности (ОЯБиН) атомной станции. Отсутствие возможности проведения подобных процедур на рабочем месте смены БЩУ делает постоянное использование нейтронно-физических кодов нерациональным.

Наиболее перспективным представляется создание методики проведения расчётов и её реализация в виде программного средства (ПС). В рамках приоритетного направления ГК «Росатом» – цифровизации [5] – такое программное средство может исполнять роль интерактивного дубликата эксплуатационной документации реактора – альбома НФХ. В связи с вышесказанным в задачу настоящей работы, проводимой специалистами Ростовской АЭС и ВИТИ НИЯУ МИФИ, вошли:

- оценка погрешности имеющейся методики оперативных расчётов изменения реактивности;
- разработка программного средства для расчёта – интерактивного дубликата альбома НФХ.

РАСЧЁТНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВВЭР-1000

Задача повышения точности нейтронно-физических расчетов активных зон реакторов является ключевой для обеспечения их безопасности. Нейтронно-физические коды используются для определения параметров активной зоны в различных режимах эксплуатации, расчета топливной кампании, выгорания ядерного топлива, эффективности органов регулирования и других важных НФХ.

Программные средства в части нейтронно-физических вычислений подразделяются на следующие группы в зависимости от сферы их применения [6]:

- прецизионные программы, как правило, основанные на методе Монте-Карло и в качестве константной базы использующие файлы оцененных значений ядерных данных;
- инженерные (спектральные) ПС, применяемые для расчета пространственно-энергетического распределения нейтронов в элементах активной зоны;
- программы-имитаторы активных зон ядерных реакторов, основанные на численном решении уравнения переноса нейтронов или диффузионном приближении.

Прецизионные программы в первую очередь используются для решения сложных и нетиповых задач физики реакторов. Также их применяют для верификации и обоснования точности инженерных ПС, которая проводится путем сравнения нейтронно-физических характеристик ядерного реактора, полученных по прецизионным и инженерным методикам. На сегодняшний день наиболее распространенным инструментом прецизионного расчета нейтронно-физических характеристик является метод Монте-Карло.

Коды класса MCNP (Monte Carlo N-Particle transport code) широко используются для моделирования процессов переноса различных частиц в сложных средах. Коды MCNP4b, MCNP4c, MCNP5, MCNPX (далее MCNP), разработанные в США в Лос-Аламосской национальной лаборатории, основываются на методах Монте-Карло и позволяют осуществлять прецизионные расчеты при решении задач нейтронной физики в ядерной промышленности.

При решении задач ядерной и радиационной безопасности стандартный код класса MCNP традиционно применяется в ИБРАЭ РАН для уточнения нейтронно-физических характеристик. В исследовательских центрах и конструкторских организациях РФ программа MCU активно используется для решения задач физики реакторов [7].

Спектральные ПС используют для создания библиотек малогрупповых констант, включающих нейтронные макроскопические сечения элементов активных зон ядерных

реакторов в зависимости от физических характеристик ядерного реактора. Среди инженерных ПС для расчета нейтронно-физических характеристик ядерных реакторов можно выделить наиболее используемые ячеечные ПС. Среди российских ПС – это ТВС-М, UNK, WIMS / ABBN. Среди ПС других стран – WIMS, CASMO, HELIOS, DRAGON.

Программа ТВС-М является основной ячейочной программой, используемой для проектных и эксплуатационных расчетов реакторов типа ВВЭР [8]. Программа создана в РНЦ им. Курчатова. Расчет сечений основан на использовании банка данных программы MCU RFFI/A и программ семейства MCU: CROSS и ТЕРМАК. ПС ТВС-М предназначено для расчета нейтронно-физических характеристик однородных топливных решеток и топливных кассет реакторов типа ВВЭР.

Программы-имитаторы активных зон ядерных реакторов позволяют выполнять сравнительно быстрые вычисления НФХ, используя предварительно подготовленную библиотеку малогрупповых констант, данные об исходном состоянии, переходном процессе.

Инженерный проектно-эксплуатационный программный комплекс КАСКАД предназначен для эксплуатационных и проектных расчетов ядерных реакторов типа ВВЭР. Комплекс программ КАСКАД включает в себя:

- спектральную программу ТВС-М (решение уравнения переноса нейтронов для отдельной кассеты и подготовка гомогенизированных констант);
- трехмерную редкосеточную диффузионную программу БИПР-7А;
- двумерную мелкосеточную диффузионную программу ПЕРМАК-А.

Потвзельная малогрупповая диффузионная программа ПЕРМАК является одной из основных программ расчета физики ВВЭР. Расчетный код БИПР проводит нодальное (покассетное) нейтронно-физическое моделирование реактора. Комплекс КАСКАД используется в РНЦ КИ, проектных организациях (ОКБ Гидропресс, ВНИИАЭС, ОКБМ) и на атомных станциях в России и других странах для обоснования характеристик топливных циклов реакторов ВВЭР. Комплекс КАСКАД внедрён на всех АЭС с ВВЭР-1000 и ВВЭР-440 [9].

Расчетно-аналитическое сопровождение эксплуатации реактора ВВЭР-1000 реализуется путем создания альбома НФХ [4], который предназначен для использования оперативным персоналом при эксплуатации реакторной установки. Альбом НФХ создаётся на основании расчётов в программах:

- БИПР-7А в части НФХ активной зоны;
- ПЕРМАК-А в части распределения энерговыделения в ТВС;
- ТВС-М для подготовки малогрупповых констант.

Данные, приведённые в альбоме НФХ, позволяют проводить оценочные расчеты переходных процессов реактора ВВЭР-1000. Расчетные изменения реактивности в результате ксеноновых переходных процессов на произвольные эффективные сутки для произвольного изменения уровня мощности запрашиваются в ОЯБиН.

В отсутствие возможности получения расчетных значений изменения реактивности, оперативный персонал может провести приблизительную оценку вручную. Однако подобные процедуры неизбежно сопряжены с проблемами, указанными выше. Разрабатываемое программное средство призвано решить эту проблему, обеспечив оперативный персонал РЦ системой информационной поддержки для быстрого автоматизированного расчёта изменений реактивности на основании данных альбома НФХ.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ РУЧНОГО РАСЧЁТА ИЗМЕНЕНИЙ РЕАКТИВНОСТИ

Как было сказано выше, ручной расчёт изменений реактивности по процедуре, описанной в альбоме НФХ, имеет присущую ему погрешность, которая преимущественно определяется:

- определением справочных данных по графикам альбома НФХ;
- погрешностью в определении исходного и конечного состояния РУ.

Так, например, для расчёта объёма борного концентрата при изменении мощности РУ используется формула (1):

$$V = \frac{V_{1K}}{1,04} \cdot \ln \frac{C_{\text{подп}} - C_0}{C_{\text{подп}} - C_{\text{кон}}} \cdot 60, \quad (1)$$

где $V_{1K} = 320 \text{ м}^3$ – объём 1 контура;

$C_{\text{подп}}$, C_0 , $C_{\text{кон}}$ (г/кг) – подпиточная, начальная и конечная концентрация борной кислоты.

Погрешность определения объёма водообмена можно найти по формуле (2):

$$\varepsilon_V = \frac{\frac{C_0 - C_{\text{кон}}}{C_{\text{подп}} - C_0 \cdot C_{\text{подп}} - C_{\text{кон}}} \cdot \Delta C_{\text{подп}} + \frac{-1}{C_{\text{подп}} - C_0} \cdot \Delta C_0 + \frac{1}{C_{\text{подп}} - C_{\text{кон}}} \cdot \Delta C_{\text{кон}} \cdot \frac{V_{1K}}{1,04} \cdot 60}{\frac{V_{1K}}{1,04} \cdot \ln \frac{C_{\text{подп}} - C_0}{C_{\text{подп}} - C_{\text{кон}}} \cdot 60}, \quad (2)$$

где $\Delta C_{\text{подп}} = \Delta C_0 = \Delta C_{\text{кон}} = \Delta C = 0,01 \frac{\text{г}}{\text{кг}}$ – погрешности измерения концентраций борной кислоты.

После преобразований с применением разложения в ряд Маклорена получаем формулу (3):

$$\varepsilon_V \approx \frac{2 \cdot \Delta C}{\delta C}, \quad (3)$$

где δC – модуль изменения концентрации борной кислоты в 1 контуре.

Для расчёта изменения реактивности при изменении мощности РУ используется формула (4):

$$\Delta \rho = W^{\text{кон}} - W^{\text{исх}} \cdot \frac{\delta \rho}{\delta N} + \frac{8}{3000} \cdot \frac{\delta \rho}{\delta T}, \quad (4)$$

где $W^{\text{кон}}$ – конечное значение уровня тепловой мощности, МВт (по показаниям);

$W^{\text{исх}}$ – исходное значение уровня тепловой мощности, МВт;

$\frac{\delta \rho}{\delta N}$ – мощностной коэффициент реактивности с учётом подогрева теплоносителя при неизменной температуре на входе в активную зону, %/МВт;

$\frac{\delta \rho}{\delta T}$ – коэффициент реактивности по температуре теплоносителя, %/°C.

Погрешность определения изменения реактивности можно найти по формуле (5):

$$\varepsilon_{\Delta \rho} = \frac{2 \cdot \Delta W}{W^{\text{кон}} - W^{\text{исх}}} + \frac{\Delta \frac{\delta \rho}{\delta N} + \frac{8}{3000} \Delta \frac{\delta \rho}{\delta T}}{\frac{\delta \rho}{\delta N} + \frac{8}{3000} \frac{\delta \rho}{\delta T}} \approx \frac{2 \cdot \Delta W}{W^{\text{кон}} - W^{\text{исх}}} + \frac{\varepsilon_N + \varepsilon_T}{2}, \quad (5)$$

где $\Delta W^{\text{кон}} = \Delta W^{\text{исх}} = \Delta W$ – абсолютная погрешность измерения мощности;

ε_N и ε_T – относительные погрешности определения мощностного и температурного коэффициентов соответственно.

Аналогичные выкладки могут быть выполнены для расчёта концентрации борной кислоты, конечной мощности, объёма дистиллята для введения положительной реактивности, конечного положения групп ОР СУЗ и т. п. При этом погрешность определения температурного коэффициента реактивности по графикам, подобным показанному на рисунке 1, составляет $\approx 3,5\%$, мощностного коэффициента – $\approx 4,2\%$, коэффициента реактивности по борной кислоте – $\approx 5\%$.

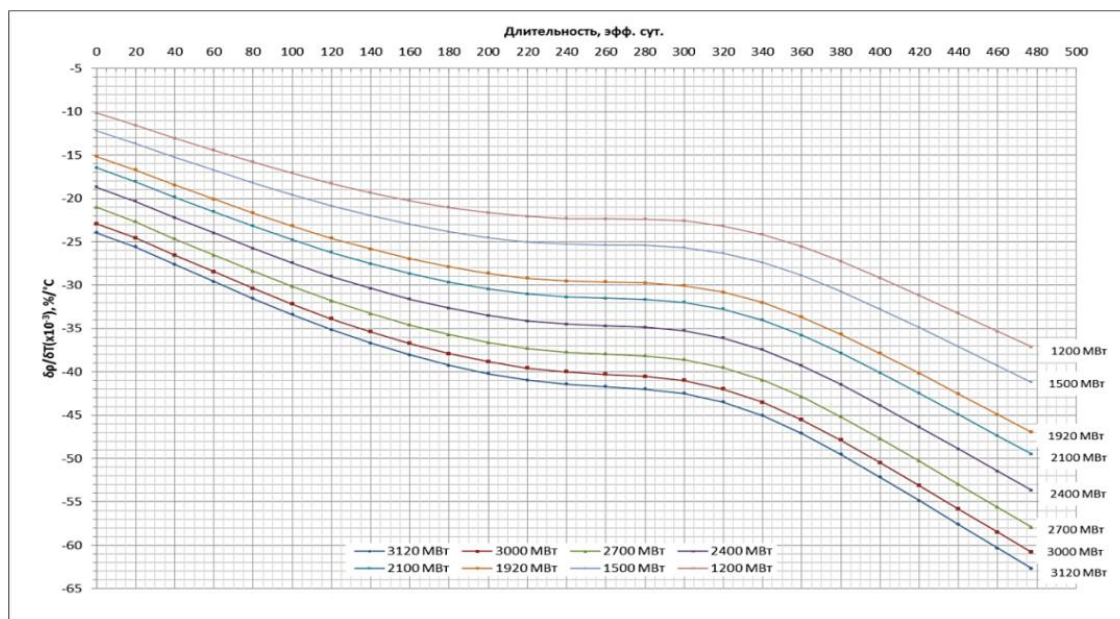


Рисунок 1 – Пример графической зависимости температурного коэффициента реактивности ВВЭР-1000 от состояния РУ [An example of the graphical dependence of the temperature coefficient of reactivity on the WWER-1000 reactor installation state]

Начальная и конечная мощности, исходя из известных характеристик системы внутриреакторного контроля (СВРК) [10], не может быть известна точнее, чем $\Delta W = 60$ МВт. Отсюда следует, что результат расчёта будет иметь заметную погрешность, тем большую, чем меньше было изменение состояния РУ. На рисунках 2 и 3 приведены зависимости относительной погрешности расчёта характеристик реакторной установки.

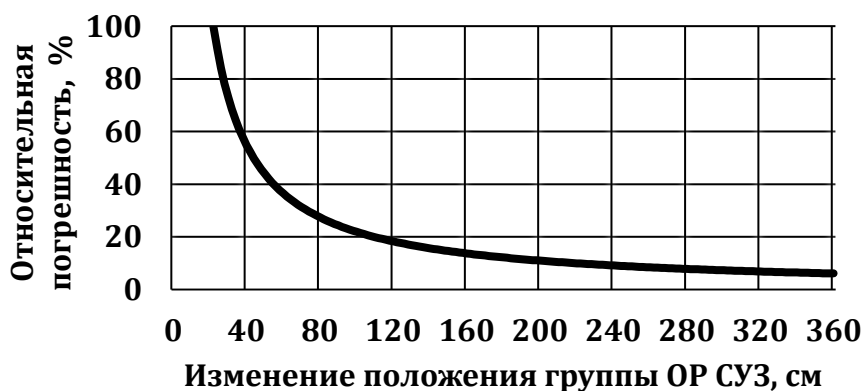


Рисунок 2 – Зависимость относительной погрешности при изменении положения группы ОР СУЗ от величины изменения [Dependence of the relative error when changing the control rod group position]

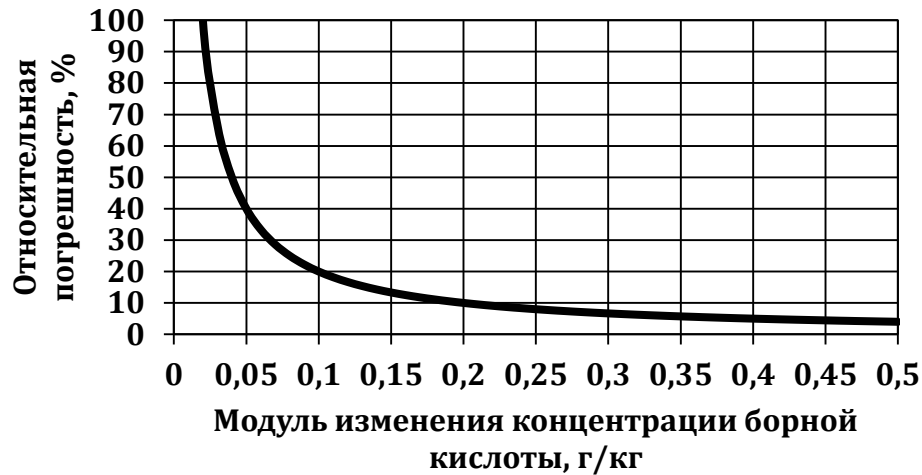


Рисунок 3 – Зависимость относительной погрешности при подпитке дистиллятом от изменения концентрации борной кислоты [The dependence of the relative error when feeding distillate from changes in the concentration of boric acid]

Учитывая малую кривизну расчётных графиков, двойная линейная интерполяция позволяет повысить точность до второго порядка [11]. Погрешность линейной интерполяции на некотором отрезке может быть оценена по формуле (6):

$$\Delta_L \leq \frac{M_2 \cdot h^2}{8}, \quad (6)$$

где M_2 – максимальное значение модуля второй производной функции на отрезке;
 h – ширина отрезка.

Так, погрешность вычисления температурного коэффициента реактивности с помощью интерполяции не превышает $2 \cdot 10^{-5}$ в единицах коэффициента реактивности, что даёт относительную погрешность не более $0,5 \cdot 10^{-2} = 0,5 \%$. Значения относительной погрешности при интерполяционном определении других величин по графикам альбома НФХ не превосходят 0,5 %.

Таким образом, программное средство, реализующее расчёт изменения реактивности с применением двойной линейной интерполяции, может снизить погрешность определения конечного состояния РУ в 8-12 раз.

РАЗРАБОТАННОЕ ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО

На основании вышесказанного было реализовано программное средство ANFC-I, основанное на процедурах и справочных данных, регламентированных альбомом НФХ топливной загрузки.

ANFC-I представляет возможность осуществления расчётов переходных процессов, связанных с изменением реактивности, во всём диапазоне мощностей, определяемом максимально допустимой тепловой мощностью реактора в зависимости от количества работающих ГЦН. Максимально допустимая тепловая мощность реактора составляет 104 % (3120 МВт) от номинальной при четырех работающих ГЦН и 40 % (1200 МВт) от номинальной при двух работающих ГЦН.

Разработанное программное средство реализует следующие виды расчетов:

- изменения положения групп ОР СУЗ при изменении мощности реактора;
- изменения концентрации борной кислоты при изменении мощности реактора;
- изменения критической концентрации борной кислоты при изменении положения групп ОР СУЗ на неизменной мощности реактора;

- времени и объёма водообмена при подпитке первого контура чистым дистиллятом или раствором борной кислоты;
- поиска критической конфигурации реактора (под конфигурацией понимается сочетание мощности, положения групп ОР СУЗ и концентрации борной кислоты) после изменения состояния РУ с учетом изменения концентрации ксенона-135;
- пусковой концентрации борной кислоты после перевода РУ в состояние «горячий останов».

На рисунках 4 и 5 приведены примеры экранных форм ANFC-I.

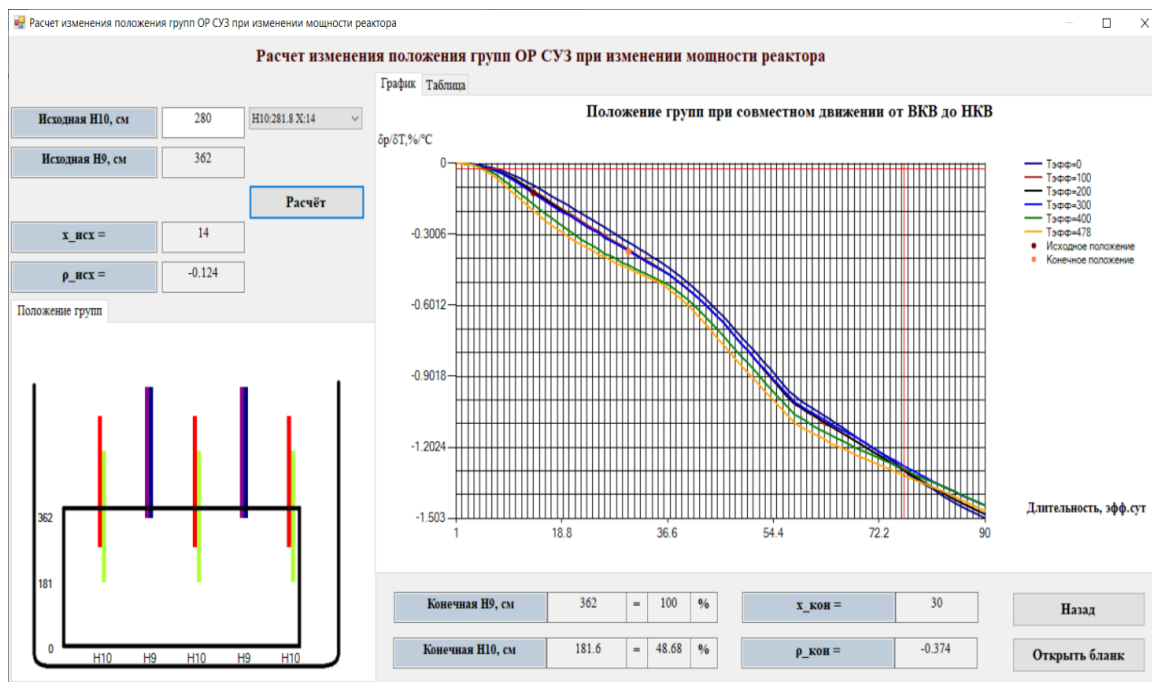


Рисунок 4 – Экранная форма расчёта положения групп ОР СУЗ [On-screen form of calculating the position of control rod groups]

Рисунок 5 – Экранная форма поиска критической конфигурации [Critical configuration search screen]

Справочные данные для выполнения расчётов ANFC-I читает из подготовленных xml-файлов, содержащих основную информацию альбома НФХ.

Программное средство не влияет на ядерную и радиационную безопасность, поскольку является средством информационной поддержки оператора РУ.

АЛГОРИТМ ПРОХОЖДЕНИЯ ЙОДНОЙ ЯМЫ С МИНИМАЛЬНЫМ ВОДООБМЕНОМ

После уменьшения мощности реакторной установки наблюдается увеличение концентрации ксенона-135 в активной зоне из-за снижения плотности потока нейтронов и, как следствие, скорости выгорания данного изотопа. Ксенон-135 является сильным поглотителем нейтронов, поэтому увеличение его концентрации приводит к введению отрицательной реактивности. Данное явление получило название «йодная яма».

Поскольку уменьшение мощности, как правильно, связано с изменением положения ОР СУЗ, это приводит к увеличению неравномерности энерговыделения в активной зоне (аксиального офсета), что обуславливает возникновение ксеноновых колебаний после прохождения «йодной ямы».

Вопрос компенсации изменений реактивности после сброса мощности РУ требует детального рассмотрения ввиду актуальности минимизации водообмена. Это позволяет уменьшить нагрузку на системы спецводоочистки и повысить экономичность эксплуатации АЭС.

При работе на мощности рабочая группа ОР СУЗ находится в рекомендованном положении на высоте от 70 % до 95 % от низа активной зоны. Для подавления ксеноновых колебаний допускается ее нахождение в нерегламентном положении не более 10 часов.

Увеличение концентрации ксенона-135, начинающееся сразу после уменьшения мощности, приводит к вводу отрицательной реактивности (погружению в «йодную яму») и требует постепенного извлечения групп ОР СУЗ из активной зоны. Если подъема рабочей группы для компенсации отравления ксеноном-135 достаточно для ее возвращения в регламентное положение, то подпитка не производится.

Следует отметить, что наиболее неблагоприятным фактором, приводящим к возникновению ксеноновых колебаний, является длительное, более 0,5-1,0 часа, положение групп ОР СУЗ в диапазоне 40-60 %. Поэтому рабочая группа должна быть приведена в регламентное положение.

Несложно предсказать существование оптимального алгоритма, обеспечивающего как минимальное искажение поля плотности потока нейтронов, так и минимальный объем водообмена. Однако характеристики данного оптимального алгоритма существенно зависят от критериев, предъявляемых в качестве оценочных для степени неблагоприятности с точки зрения эксплуатации к неравномерности поля энерговыделения и системам подпитки-продувки и водоподготовки.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ANFC-I

По результатам опытной эксплуатации разработанного программного средства в учебно-тренировочном подразделении Ростовской АЭС отмечено следующее:

- освоение интерфейса и работы программы занимает у квалифицированного персонала РЦ (ВИУР, НСРЦ) не более 15-30 минут;
- программное средство реализует заявленный функционал в полном объеме;
- по замечаниям эксплуатирующего персонала РЦ улучшено удобство элементов интерфейса ANFC-I;
- в процессе тренировок на полномасштабном тренажере на расчёт изменения реактивности персонал тратит не более 1-2 минут в условиях действия отвлекающих факторов.

Общепринятой практикой является подтверждение точности расчётных методик, связанных с изменениями реактивности реакторов ВВЭР, испытаниями в условиях полномасштабного тренажера [12]. В связи с этим в настоящее время проводится

подобного рода тестирование на базе учебно-тренировочного подразделения Ростовской АЭС.

Таким образом, проведённая работа показала возможность повышения точности и скорости оперативных расчётов изменения реактивности путём дополнения расчётно-аналитического сопровождения ВВЭР-1000 разработанным авторами программным средством – интерактивным дубликатом альбома НФХ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Система PRIS МАГАТЭ [Электронный ресурс] / Ресурс МАГАТЭ PRIS посвященный опыту эксплуатации АЭС в мире. – URL : <https://www.iaea.org/PRIS/>. (дата обращения: 19.02.2019).
2. НП-082-07 «Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций»
3. Белозеров, В.И. Физика и эксплуатационные режимы реактора ВВЭР-1000 [Текст] / В.И. Белозеров, М.М. Жук, Ю.А. Кузина, М.Ю. Терновых. – Монография. Москва : НИЯУ МИФИ, 2014. – 288 с.
4. РД ЭО 1.1.2.25.0445-2016 «Требования к содержанию альбома нейтронно-физических характеристик топливных загрузок реакторов ВВЭР 1000 и ВВЭР-1200»
5. Росатом выстраивает единую цифровую стратегию развития атомной отрасли [Электронный ресурс] Сайт Госкорпорации Росатом // URL : <https://www.rosatom.ru/journalist/news/rosatom-vystraivaet-edinuyu-tsifrovuyu-strategiyu-razvitiya-atomnoy-otrasli/> (дата обращения: 03.06.2019).
6. Калугин, М.А. Развитие прецизионных и инженерных методов и программ расчета ядерных реакторов с использованием алгоритмов Монте-Карло : дис. докт. тех. наук: 05.13.18 [Текст] / М.А. Калугин. – Москва, 2009. – 295 с.
7. Митенкова, Е.Ф. Анализ нейтронно-физических характеристик в ячеечных расчетах реактора ВВЭР с использованием кодов MCNP5 и MCU_FREE [Текст] / Е.Ф. Митенкова, П.А. Кизуб, Д.А. Колташев. – Препринт. Ин-т проблем безопас. развития атом. энергетики РАН. – № ИБРАЕ-2013-04. – Москва : ИБРАЭ РАН, 2013. – 23 с.
8. Курченко, А.Ю. Программа ТВС-М. Описание алгоритма и инструкция для пользователей [Текст] / А.Ю. Курченко, С.Н. Большагин. – Отчет РНЦ КИ, инв. № 32/1-18-203 от 21.04.2003. – Москва. – 2003.
9. Томилов, М.Ю. Комплекс программ КАСКАД. Инструкция по использованию графического интерфейса комплекса КАСКАД [Текст] / М.Ю. Томилов, Н.А. Бычкова, Е.К. Косоуров // Отчет РНЦ КИ, инв. № 32/1-51-402 от 28.11.2002. – 2002
10. Добротворский, А.Н. Разработка и обоснование методики определения средневзвешенной мощности реактора энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000: дис. канд. техн. наук : 05.14.03 [Текст] / А.Н. Добротворский. – Нововоронеж, 2017. – 190 с.
11. Амосов, А.А. Вычислительные методы для инженеров [Текст] / А.А. Амосов, Ю.А. Дубинский, Н.В. Копченкова – Москва : Высш. шк., 1994. – 544 с.
12. Семёнов, В.К. Оценка точности метода определения коэффициентов реактивности и эффективности твердых поглотителей на основе решения обратной задачи динамики точечного реактора [Текст] / В.К. Семёнов, М.А. Вольман // Глобальная ядерная безопасность, 2018 – № 3 – С. 64-72.

REFERENCES

- [1] Sistema PRIS MAGATE` [The IAEA PRIS System]. Resurs MAGATE` PRIS posvyashhenny`j opy`tu e`kspluatcii AE`S v mire [The IAEA PRIS Resource Dedicated to the Experience of Operating Nuclear Power Plants in the World]. URL : <https://www.iaea.org/PRIS/> (in Russian).
- [2] NP-082-07 «Pravila yadernoj bezopasnosti reaktorny`x ustanovok atomny`x stancij» [Nuclear Safety Regulations for Nuclear Installations at Nuclear Installations] (in Russian).
- [3] Belozеров V.I., Zhuk M.M., Kuzina Yu.A., Ternovy`x M.Yu.. Fizika i e`kspluatatsionny`e rezhimy` reaktora VVE`R-1000 [Physics and Operating Conditions of the WWER-1000 Reactor]. Monograph. Moscow: National Research Nuclear University MEPhI. 2014. 288 p. (in Russian).
- [4] RD E`O 1.1.2.25.0445-2016 «Trebovaniya k soderzhaniyu al`boma nejtronno-fizicheskix xarakteristik toplivny`x zagruzok reaktorov VVE`R 1000 i VVE`R-1200» [Requirements for the Content of the Album of Neutron-Physical Characteristics of the Fuel Column of WWER 1000 and WWER -1200 Reactors] (in Russian).

- [5] Rosatom vy`straivaet edinuyu cifrovuyu strategiyu razvitiya atomnoj otrasli [Rosatom is Building a Unified Digital Strategy for the Nuclear Industry Development] The site of Rosatom State Corporation. URL : <https://www.rosatom.ru/journalist/news/rosatom-vystraivaet-edinuyu-tsifrovuyu-strategiyu-razvitiya-atomnoy-otrasli> (in Russian).
- [6] Kalugin, M.A. Razvitie precizionny`x i inzhenerny`x metodov i programm rascheta yaderny`x reaktorov s ispol`zovaniem algoritmov Monte-Karlo : dis. dokt. tex. nauk: 05.13.18 [Development of Precision and Engineering Methods and Programs for Calculating Nuclear Reactors Using Monte-Carlo Algorithms: Thesis of Dr. in Engineering: 05.13.18]. Moscow. 2009. 295 p. (in Russian).
- [7] Mitenkova E.F., Kizub P.A., Koltashev D.A. Analiz nejtronno-fizicheskix xarakteristik v yachechny`x raschetax reaktora VVE`R s ispol`zovaniem kodov MCNP5 i MCU_FREE [Analysis of Neutron-Physical Characteristics in Cell Calculations of a WVER Reactor Using the MCNP5 and MCU_FREE codes] Preprint. Institute of Problems of Nuclear Energy Security Development RAS. IBRAE-2013-04. Moscow: IBRAE RAS. 2013. 23 p. (in Russian).
- [8] Kurchenokov A.Yu., Bol`shagin S.N. Programma TVS-M. Opisanie algoritma i instrukciya dlya pol`zovatelej [TVS-M program Description of the Algorithm and Instructions for Users]. Report of RRC KI. inv. № 32/1-18-203. 21.04.2003. Moscow. 2003 (in Russian).
- [9] Tomilov M.Yu., By`chkova N.A., Kosourov E.K.. Kompleks programm KASKAD. Instrukciya po ispol`zovaniyu graficheskogo interfejsa kompleksa KASKAD [Complex Programs CASCADE. Instructions for Using the Graphic Interface of the CASCADE Complex] Report of the RRC KI. inv. № 32/1-51-402. 28.11.2002. 2002 (in Russian).
- [10] Dobrotvorskij, A.N. Razrabotka i obosnovanie metodiki opredeleniya srednevzveshennoj moshhnosti reaktora e`nergoblokov AE`S s VVE`R-1000 : dis. kand. texn. nauk : 05.14.03 [Development and Substantiation of the Methodology for Determining the Weighted Average Power of the NPP units with WVER -1000 Reactor: Abstract Thesis of PhD in Engineering]. Novovoronezh. 2017. 190 p. (in Russian).
- [11] Amosov A.A., Dubinskij Yu.A., Kopchenova N.V. Vy`chislitel`ny`e metody` dlya inzhenerov: Ucheb. Posobie [Computational Methods for Engineers: Proc. Manual]. Moscow: Higher School 1994. 544 p. (in Russian).
- [12] Semyonov V.K., Vol`man M.A. Ocenka tochnosti metoda opredeleniya koe`fficientov reaktivnosti i e`ffektivnosti tverdyy`x poglotitelej na osnove resheniya obratnoj zadachi dinamiki tochechnogo reaktora [Accuracy Estimation of the Method for Determining the Reactivity Coefficients and Efficiency of Solid Absorbers Based on the Solution of the Inverse Problem of the Point Reactor Dynamics] // Global nuclear safety. 2018. №3. P. 64-72 (in Russian).

Interactive Album of Neutron-Physical Characteristics of WVER Reactor Fuel Column

A.A.Lapkis¹, V.A.Ignatkin², M.A.Kolomietz³

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

¹ORCID ID: 0000-0002-9431-7046

e-mail: aalapkis@mephi.ru

²ORCID ID: 0000-0002-1759-5675

³ORCID ID: 0000-0002-0027-4306

e-mail: mariya.kolomiec.97@mail.ru

Abstract – The paper describes the method and software developed by the authors for automating operational calculations of reactivity changes of the WVER-1000 reactor. The main calculation dependencies, screen forms and test results are given. Rising of the calculation accuracy is shown. The development path of the developed software as an element of the digital twin of the WVER 1000 nuclear reactor is proposed.

Keywords: WVER-1000, reactivity, fuel loading, reactivity effects, reactivity coefficients, control rod, rod bank, neutron-physical characteristics.

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 658.562:681.3

**МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
ПОДСИСТЕМ**

© 2019 Э.И. Цветков *, Ю.П. Муха **, И.Ю. Королева **, А.Д. Королев **

**Государственный электротехнический университет (ЛЭТИ), Санкт-Петербург, Россия*

***Волгоградский Государственный Технический Университет, Волгоград, Россия*

Развитие измерительных технологий порождает соответствующие проблемы при проведении метрологических испытаний. В частности, появляется потребность в учете влияния используемого интерфейса на свойства погрешностей результатов измерений. Появление погрешностей датирования – следствие все более широкого распространения многофункциональных измерительных средств, порождает потребность разработки соответствующих процедур метрологического анализа, включая метрологические испытания. Поэтому актуальна проблема совершенствования метрологических испытаний измерительных систем в целом и их подсистем. Научная новизна состоит в разработке алгоритма испытаний и выводе оценочных соотношений, связанных с определением вероятностных характеристик соответствующих погрешностей. Практическая значимость состоит в разработке структурной схемы испытательного эксперимента. Инновационная ценность заключается в возможности синтеза испытательных методик для аттестации измерительных подсистем и измерительных систем в целом, учитывающих погрешности датирования в рамках погрешностей сдвига.

Ключевые слова: измерительные технологии, метрологические испытания, метрологический анализ, погрешность результатов измерений, погрешность датирования, сложная измерительная система, измерительная подсистема, вероятностная характеристика погрешности, метрологическая надежность, гибкий интеллектуальный интерфейс

Поступила в редакцию 20.05.2019

После доработки 23.05.2019

Принята к публикации 24.05.2019

ВВЕДЕНИЕ

Развитие измерительных технологий порождает соответствующие проблемы при проведении метрологических испытаний. В частности, появляется потребность в учете влияния используемого интерфейса на свойства погрешностей результатов измерений. Действительно, в многофункциональной информационной системе передача информации от одной подсистемы к другой (например, передача результатов измерения для их использования при формировании управляющих воздействий) повышает роль так называемых погрешностей датирования [1-2], что порождает необходимость определенной трансформации метрологических испытаний для обеспечения возможной достоверности результатов аттестации и верификации.

Появление погрешностей датирования – следствие все более широкого распространения многофункциональных измерительных средств, порождает потребность разработки соответствующих процедур метрологического анализа, включая метрологические испытания. Появление погрешностей сдвига, обусловленных конечностью быстродействия цифровых устройств (интерфейсных блоков), в том числе [3], влияет не только на точность получаемых результатов измерений, но и на

организацию метрологических испытаний, проводимых при аттестации и верификации соответствующих средств измерений.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Поскольку метрологические испытания составляют неотъемлемую часть процедуры подготовки измерительного средства к получению результатов, удовлетворяющих требованиям системы обеспечения единства измерений, ими должны быть охвачены все ситуации, в которых предполагается его использование. Традиционно к характеристикам возможных ситуаций относятся род измеряемой величины, требования к характеристикам погрешностей результатов измерений и, наконец, условия (нормальные, в которых влияющие факторы не учитываются, и аномальные, в которых требуется учитывать изменение характеристик погрешностей в зависимости от влияющих факторов). К влияющим факторам относят характеристики условий проведения измерений – температура и влажность окружающей среды, давление и др. Рост требований к адекватности результатов метрологических испытаний реальным характеристикам измерительных средств приводит к необходимости введения в рассмотрение и использования новых влияющих факторов. Так, при установлении характеристик метрологической надежности необходимо анализировать зависимость метрологических характеристик средства и получаемых с его помощью результатов от длительности и условий эксплуатации, результаты измерения вероятностных характеристик случайных процессов существенно зависят от степени неэргодичности последних и т.п.

ИСПЫТАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПОДСИСТЕМ

Как известно ([3]), погрешности датирования, обусловленные конечностью быстродействия используемого интерфейса, определяются соотношением по формуле (1):

$$\Delta_{\text{ДАТ}} \lambda_j^* = \lambda_j(t_j + \Delta t_{\text{ИЗМ}}) - \lambda_j(t_j + \Delta t_{\text{ИЗМ}} + \Delta t_{\text{СДj}}), \quad (1)$$

т.е. определяется временем сдвига – временем, затрачиваемым интерфейсом на перенос результата измерений во входной регистр канала, использующего этот результат, и изменением измеряемой величины на этом интервале, поскольку действует формула (2):

$$\Delta t_{\text{СДj}} = t_{\text{jП}} - t_{\text{jФ}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{jФ}}$ – момент формирования результата измерений;

$t_{\text{jП}}$ – момент представления результата измерения пользователю.

Погрешность датирования в той ее части, которая связана с конечностью быстродействия используемого интерфейса, в предположении линейного изменения измеряемой величины $\lambda_j(t) = \lambda_j + k_j \cdot (t - t_j)$ на интервале измерений, может быть представлена формулой (3):

$$\Delta_{\text{ДАТ}} \lambda_j^* = -k_j \Delta t_{\text{СДj}}, \quad (3)$$

где k_j – производная, характеризующая линейное изменение измеряемой величины во времени.

Как уже было отмечено, погрешности датирования имеют ряд особенностей, обусловленных характером их формирования, что необходимо учитывать при синтезе процедуры метрологических испытаний.

Из приведенных соотношений видно, что погрешности датирования определяются скоростью изменения измеряемой величины и временем сдвига. В свою очередь время сдвига определяется характеристиками интерфейса и текущим режимом работы информационной системы, в состав которой входит измерительное средство. Это вытекает из того, что режимом работы определяются выполняемые интерфейсом функции. Соответственно меняются и характеристики временного сдвига. Очевидно, что при решении одной конкретной задачи (например, управление технологическим процессом), характеристики временного сдвига $\Delta t_{\text{сд}}$ будут отличаться от соответствующих характеристик при обеспечении интерфейсом нескольких функций (управление несколькими технологическими процессами, принятие решений об изменении технологического процесса и т.п.).

Характерным примером в этом отношении является гибкий интеллектуальный интерфейс (ГИИ) [4-7]. Его структура приведена на рисунке 1.

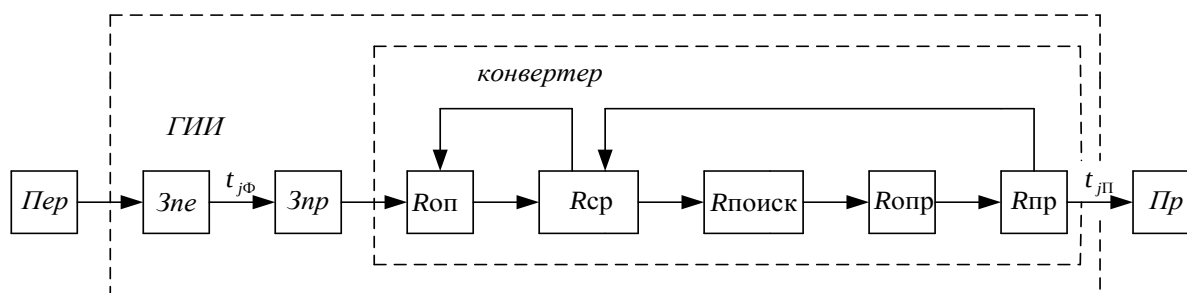


Рисунок 1 – Блок-схема ГИИ ($З_{\text{пр}}$ – блок запроса приемника; $З_{\text{пе}}$ – блок запроса передатчика; Пр – блок приема; ($R_{\text{опр}}$) – блок определения систем кодирования источника и приемника; ($R_{\text{ср}}$) – блок сравнения; ($R_{\text{поиск}}$) – блок поиска; ($R_{\text{оп}}$) – блок оптимизации; ($R_{\text{пр}}$) – блок преобразования; ($R_{\text{пров}}$) – блок проверки; Пер – блок передачи) [Flowchart flexible intelligent interface ($З_{\text{пр}}$ – receiver request block; $З_{\text{пе}}$ – transmitter request unit; Пр – receiving unit; ($R_{\text{опр}}$) – source and receiver coding system detection unit; ($R_{\text{ср}}$) – comparison block; ($R_{\text{поиск}}$) – search block; ($R_{\text{оп}}$) – optimization block; ($R_{\text{пр}}$) – conversion unit; ($R_{\text{пров}}$) – check block; Пер – transmission unit)]

В начале работы алгоритма конвертации выполняется проверка текущего состояния, то есть реализуется ли режим функционирования или режим обучения. Режим обучения связан с обучением нейронной сети распознавать, по заранее заготовленным эталонным сообщениям, различные форматы кодирования. Этот режим обязательно должен быть реализован ранее режима функционирования. Иначе ГИИ не сможет выполнить распознавание пришедшего от передатчика сообщения.

Режим функционирования связан с выполнением всех функций ГИИ: распознает пришедшую информацию, выполняет сравнения систем представления информации приемника и передатчика и дальнейшее преобразование этих систем. После

конвертации выполняется сравнение преобразованного файла с первоначально принятым. Это реализуется с помощью алгоритма перцептивного хэша [4].

При этом работа ГИИ осуществляется циклически и новый цикл не может быть начат, пока не завершен предыдущий.

Шаги R_i реализуются на базе электронных компонентов, составляющих конкретные структуры микроконтроллеров, образующих их электронный состав. Таким образом, ГИИ выполняет совокупность сложных преобразований сформированной информации, что и определяет появление дополнительного временного сдвига и погрешности датирования. Особенности формирования погрешности датирования делают целесообразным рассматривать операцию временного сдвига результата измерений, обусловленного конечностью быстродействия интерфейса, как измерительное преобразование, завершающее процедуру измерений. Таким образом, если последовательность операций формирования результата измерений представляется уравнением (4) [8]:

$$\lambda_j^* = R_m \cdots R_1 \gamma, \quad (4)$$

то последовательность операций с учетом вносимого интерфейсом временного сдвига представляется уравнением (5):

$$\lambda_j^* = R_{\text{пер}i} \cdots R_1 \gamma, \quad (5)$$

где $R_{\text{пер}i}$ – оператор, представляющий реализуемое интерфейсом преобразование при i -ом режиме работы информационной системы, составной частью которой является измерительная подсистема.

Таким образом, специфической особенностью полной погрешности, включающей в себя погрешность датирования, является сравнение получаемых результатов измерений $\lambda_j^*(t_j + \Delta t_{\text{изм}})$ не с истинными значениями в момент формирования результата $t_j + \Delta t_{\text{изм}}$, а с истинным значением $\lambda_j(t_j + \Delta t_{\text{изм}} + \Delta t_{\text{сд}})$ в момент представления результата – $t_j + \Delta t_{\text{изм}} + \Delta t_{\text{сд}}$. При этом характеристики $\Delta t_{\text{сд}}$ зависят от режима работы информационной системы. Соответственно последовательности операций, выполняемых при проведении метрологических испытаний, приобретают вид, представленный на рисунке 2.

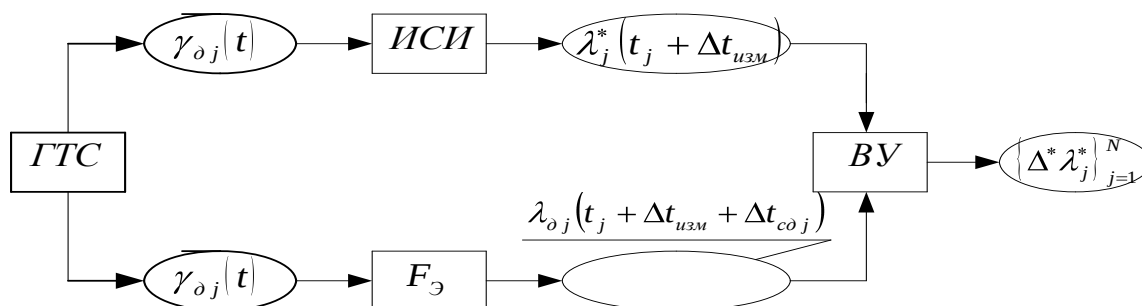


Рисунок 2 – Схема метрологических испытаний (ГТС – генератор тестовых сигналов; ИСИ – испытываемое средство измерений; БУ – вычитающее устройство) [The scheme of metrological tests (ГТС – generator of test signals; ИСИ – the test instrument of measurement; БУ – subtractive device)]

Процедуру установления вероятностной характеристики полной погрешности $\Theta[\Delta\lambda_j^*]$, включающей в себя погрешность датирования, можно представить следующей последовательностью отображений (6):

$$A3 \rightarrow \{\Delta^* \lambda_j^* = \lambda_j^* - \lambda_{dj}^*\}_{j=1}^N \rightarrow \Theta^*[\Delta_{\text{дат}}^* \lambda_j^*] = \sum_{j=1}^N g[\Delta_{\text{дат}}^* \lambda_j^* / N]. \quad (6)$$

При необходимости определяются вероятности погрешности датирования (7):

$$A3 = (\Delta_{\text{дат}}^* \lambda_j^* = -k_j \Delta t_{\text{сд}j}, k_j^* = (\lambda_j^* - \lambda_{j-1}^*) / \Delta t_{\text{изм}}, \Delta^* t_{\text{сд}j} = t_{j\Pi}^* - t_{j\Phi}^*, \Delta_{\text{дат}}^* \lambda_j^* = k_j^* \Delta^* t_{\text{сд}j}, \Delta t_{\text{изм}}, \Theta^*[\Delta_{\text{дат}}^* \lambda_j^*] = \sum_{j=1}^N g[\Delta_{\text{дат}}^* \lambda_j^* / N] \rightarrow \{\lambda_{j-1}^*, \lambda_j^*\}_{j=1}^N \rightarrow \{k_j^*, \Delta^* t_{\text{сд}j}\}_{j=1}^N \rightarrow \{\Delta_{\text{дат}}^* \lambda_j^*\}_{j=1}^N \rightarrow \Theta^*[\Delta_{\text{дат}}^* \lambda_j^*] = \sum_{j=1}^N g[\Delta_{\text{дат}}^* \lambda_j^* / N] \quad (7)$$

($\Delta t_{\text{изм}}$ – время, затрачиваемое на одно измерение, $g[\Delta_{\text{дат}}^* \lambda_j^*]$ – преобразование, лежащее в основе определения вероятностной характеристики $\Theta[\Delta\lambda_j^*]$).

Результаты (6) и (7) относятся к фиксированному режиму работы информационной системы. Соответственно метрологические испытания должны охватывать все возможные режимы с определением вероятностных характеристик соответствующих погрешности [9-11].

Модель функционирования виртуальной информационной системы в фиксированном режиме представлена на рисунке 3.

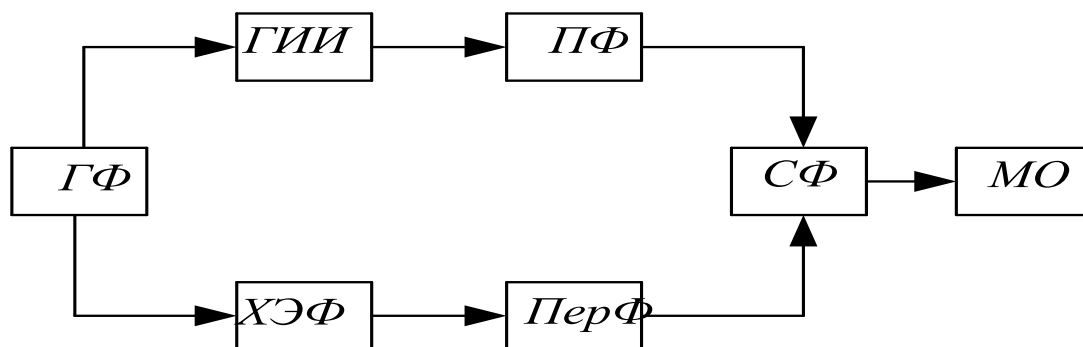


Рисунок 3 – Структурная схема испытательного эксперимента (ГФ – генератор файла; ГИИ – гибкий интеллектуальный интерфейс; ПФ – преобразованный файл; ХЭФ – хранение эталонного файла; ПерФ – переданный файл; СФ – сравнение файлов; Мо – множество отличий в сравниваемых файлах) [Block diagram of the test experiment (ГФ – file generator; ГИИ - flexible intelligent interface; ПФ – converted file; ХЭФ – storage of reference file; ПерФ – transferred file; СФ – file comparison; Мо – many differences in compared files)]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, появление погрешности датирования требует существенной трансформации метрологических испытаний измерительных подсистем в целях учета изменения действительного значения измеряемой величины, во-первых, и зависимости

вероятностных характеристик погрешностей от режима работы информационной системы, во-вторых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муха, Ю.П. Особенности коррекции погрешностей датирования [Текст] / Ю.П. Муха, Э.И. Цветков, И.Ю. Королева, А.Д. Королев // Телекоммуникации. – 2018. – № 4. – С. 32-39.
2. Муха, Ю.П. Погрешности датирования телекоммуникационных систем измерения [Текст] / Ю.П. Муха, Э.И. Цветков, И.Ю. Королева, А.Д. Королев // Телекоммуникации. – 2017. – № 6. – С. 43-48.
3. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2016616056 от 3 июня 2016 г. Российская Федерация. Гибкий интеллектуальный интерфейс (ГИИ) / Ю.П. Муха, А.Д. Королев. – ВолгГТУ. – 2016.
4. Муха, Ю.П. Погрешность датирования (сдвига) результатов измерений и ее связь с характеристиками интерфейса [Текст] / Ю. П. Муха, Э.И. Цветков, И.Ю. Королева // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 2 (19). – С. 50-58.
5. Муха, Ю.П. Синтез алгоритма управления ГИИ для систем технического зрения [Текст] / Ю.П. Муха, И.Ю. Королева, А.Д. Королев // Телекоммуникации. – 2016. – № 1. – С. 7-12.
6. Муха, Ю.П. Гибкий интеллектуальный интерфейс для систем передачи медицинской информации [Текст] / Ю.П. Муха, И.Ю. Королева, А.Д. Королев // Prospero: науч. журнал. – 2015. – № 5 (17). – С. 59-61.
7. Муха, Ю.П. Разработка гибкого интерфейсного блока на базе GHI G-400D [Текст] / Ю.П. Муха, А.Д. Королев // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации. Распознавание : материалы XII междунар. науч.-техн. конф. Курск, 12-16 мая 2015 г. – Курск: Юго-Западный гос. ун-т, 2015. – С. 269-270.
8. Цветков, Э.И. Основы математической метрологии [Текст] / Э.И. Цветков. – Санкт-Петербург : Политехника, 2005. – 510 с.
9. Цветков, Э.И. Метрология. Модели. Метрологический анализ. Метрологический синтез [Текст] / Э.И. Цветков. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 293 с.
10. Цветков, Э.И. Метрологические испытания без применения эталонов [Текст] / Э.И. Цветков // Мир измерений. – 2016. – С. 12-18.
11. Боброва, М.Н. Метрологические испытания средств измерений вероятностных характеристик случайных процессов [Текст] / М.Н. Боброва, Е.С. Сулоева, А.В. Царева, Э.И. Цветков // Материалы XXI Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям. Санкт-Петербург, 23-25 мая 2018 г. – Санкт-Петербург : ЛЭТИ, 2018. – Т. 1. – С. 62-65.

REFERENCES

- [1] Mucha Y.P., Cvetkov E.I., Koroleva I.Y., Korolev A.D. Osebnosti korrektsii pogreshnosti datirovaniya [Features of correction of errors of dating] [Telecommunications]. 2018. № 4. P. 32-39 (in Russian).
- [2] Mucha Y.P., Cvetkov E.I., Koroleva I.Y., Korolev A.D. Pogreshnosti datirovaniya telekommunikatsionnih sistem izmereniya [Errors of Dating of Telecommunication Systems of Measurement] [Telecommunications]. 2017. № 6. P. 43-48 (in Russian).
- [3] Mucha Y.P., Korolev A.D. Svidetelstvo o gosudarstvennoi registratsii programmi dlya EVM № 2016616056 ot 3 iunya 2016. Gibkii intellektualnii interfeis [Certificate on the State Registration of the Computer Program № 2016616056, June 3, 2016, Russian Federation. Flexible Intellectual Interface] Volgograd State Technical University. 2016 (in Russian).
- [4] Mucha Y.P., Cvetkov E.I., Koroleva I.Y. Pogreshnost datirovaniya (sdviga) rezultatov izmerenii i svyaz s kharakteristikami interfeisa [Error of Dating (Shift) of Results of Measurements and its Communication with Characteristics of the Interface] [Global Nuclear Safety]. 2016. №2 (19). P. 50-58 (in Russian).
- [5] Mucha Y.P., Koroleva I.Y., Korolev A.D. Sintez algoritma upravleniya GII dlya sistem tekhnicheskogo zreniya [Synthesis of a Control Algorithm of GII for the Systems of Technical Sight] [Telecommunications]. 2016. № 1. P. 7-12 (in Russian).
- [6] Mucha Y.P., Koroleva I.Y., Korolev A.D. Gibkii itellektulnii interfeis dlya system peredachi medicinskoj informacii [The Flexible Intelligent Interface for Transmission Systems of medical Information] [Prospero]. 2015. № 5 (17). P. 59-61(in Russian).
- [7] Mucha Y.P., Korolev A.D. Razrabotka gibkogo interfejsnogo bloka na baze GHI G-400D [Development of the Flexible Interface Block on the Basis of GHI G-400D.]. Optiko-e`lektronny`e

- pribory` i ustrojstva v sistemax raspoznavaniya obrazov, obrabotki izobrazhenij i simbol`noj informacii. Raspoznavanie : materialy` XII mezhdunar. nauch.-texn. konf. Yugo-Zapadny`j gos. un-t [Optical-Electronic Devices and Devices in the Systems of Recognition of Images, Processings of Images and Symbolical Information. Recognition XII International Scientifically Technical Conference. Kursk. Southwest state university]. Kursk. 12-16 may 2015. P. 269-270 (in Russian).
- [8] Cvetkov E.I. Osnovi matematicheskoi metrologii [Fundamentals of Mathematical Metrology]. St. Petersburg. Politekhnik. 2005. 510 p. (in Russian).
- [9] Cvetkov E.I. Metrologiya. Modeli. Metrologicheskii analiz. Metrologicheskii sintez. [Metrology. Models. Metrological Analysis. Metrological Synthesis]. St. Petersburg State Electrotechnical University. 2014. 293 p. (in Russian).
- [10] Cvetkov E.I. Metrologicheskie ispitaniya bez primeneniya etalonov [Metrological Tests without Application of Standards] [World of Measurements]. 2016. P.12-18 (in Russian).
- [11] Bobrova M.N., Suloeva E.S., Careva A.V., Cvetkov E.I. Metrologicheskie ispy`taniya sredstv izmerenij veroyatnostny`x karakteristik sluchajny`x processov [Metrological Tests of Measuring Instruments of Probabilistic Characteristics Of Accidental Processes]. Materialy` XXI Mezhdunarodnoj konferencii po myagkim vy`chisleniyam i izmereniyam. LE`TI [XXI International Conference on Soft Calculations and Measurements. St. Petersburg State Electrotechnical University]. St. Petersburg. 23-25 may 2018. Vol.1. P.62-65 (in Russian).

Metrological Tests of Measuring Subsystems

E.I. Cvetkov^{*1}, Yu.P. Mucha^{2}, I.Y. Koroleva^{**3}, A.D. Korolev^{**4}**

**State Electrotechnical University (LETI), St. Petersburg, Russia, post office box 654 (Information-measuring systems and technologies, Russia, 197046, St. Petersburg, PO Box 654)*

¹ORCID ID: 0000-0001-8733-713X

Wos Researher ID: O-4592-2019

e-mail: er-cvetkov@mail.ru

***Volgograd State Technical University, etc. to them. Lenin, 28, (8442) Volgograd, Russia 400005*

²ORCID ID: 0000-0003-0919-5732

Wos Researher ID: M-4084-2015

e-mail: muxaup@mail.ru

³ORCID ID: 0000-0002-9185-6976

Wos Researher ID: N-4037-2015

e-mail: artmd64@rambler.ru

⁴ORCID ID: 0000-0003-2175-2204

Wos Researher ID: G-21091-2017

e-mail: artmd64@mail.ru

Abstract – Development of measuring technologies creates the corresponding problems when carrying out metrological tests. In particular, the need for taking note of the used interface on properties of errors of results of measurements appears. Emergence of errors of dating is a consequence of more and more wide circulation of multipurpose measuring means generates requirement of development of the corresponding procedures of the metrological analysis, including metrological tests. Therefore, the problem of improvement of metrological tests of measuring systems in general and their subsystems is relevant. The scientific novelty consists in development of an algorithm of tests and a conclusion of the estimated ratios connected with definition of probabilistic characteristics of the corresponding errors. The practical importance consists in development of the block diagram of a test experiment. Innovative value consists in a possibility of synthesis of test techniques for certification of the measuring subsystems and measuring systems in general considering dating errors within shift errors.

Keywords: measuring technology, metrological tests, metrological analysis, measurement error, the error of dating, complex measuring system, measuring subsystem, probabilistic characteristic of an error, metrological reliability, flexible intelligent interface.

УДК.528.48

КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТАПЕЛЯ-КАЛИБРАТОРА ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК НА АТОМНЫХ СТАНЦИЯХ

© 2019 Ю.И. Пимшин*, Г.А. Наumenко**, Ю.А. Псарёв**

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

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

В работе рассмотрены методики контроля геометрических параметров стапеля-калибратора тепловыделяющих сборок (ТВС), используемых в реакторе ВВЭР-1000 для формирования управляемой ядерной реакции и получения тепловой энергии. Варианты технологий контроля реализуются при допущении тепловыделяющих сборок для установки их в реакторе, на стадии монтажа атомной станции (АС) и ее эксплуатации.

Ключевые слова: атомная станция, тепловыделяющая сборка, контрольные измерения, соосность, расположение, ошибка измерения, средство измерения.

Поступила в редакцию 26.10.2018

После доработки 19.11.2018

Принята к публикации 11.12.2018

Тепловыделяющая сборка предназначена для получения тепловой энергии в ядерном реакторе за счёт осуществления управляемой ядерной реакции. ТВС реактора ВВЭР-1000 представляет собой конструкцию, имеющую в горизонтальном сечении габаритный шестигранник правильной формы, при этом его продольная общая длина 4570 мм (рис. 1).

В верхней и нижней частях ТВС установлены концевые детали, служащие для фиксации кассеты в установочных гнездах активной зоны. Верхняя концевая деталь (головка) обеспечивает взаимодействие с внутри-корпусными устройствами реактора и поджатие ТВС от всплытия, а также разъёмное соединение с каркасом ТВС. Нижняя концевая деталь (хвостовик) обеспечивает заданное местоположение кассеты в активной зоне, а также организацию протока теплоносителя.

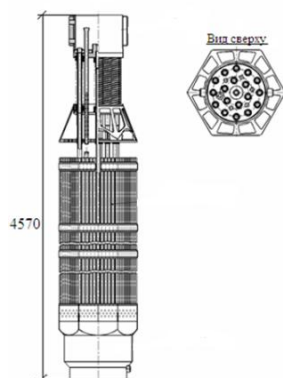


Рисунок 1 – Схема ТВС [FA scheme]

Для допуска установки ТВС в реактор, сборка проходит контроль ее геометрических параметров в узле свежего топлива (УСТ) атомной станции [1-5]. Для

этого используют специальное оборудование – стапель, установленный в УСТ. Стапель – это технологическое оборудование, предназначенное для контроля геометрических параметров тепловыделяющих сборок. Его использование обеспечивает контроль размеров, формы и взаимного расположения поверхностей, контролируемых ТВС. Проверку осуществляют путем пропускания кассеты через 19 консолей, закрепленных на стальной раме (рис. 2). Форма внутренних поверхностей консолей повторяет форму кассеты. По результатам прохождения ТВС через стапель производят отбраковку тепловыделяющих сборок.

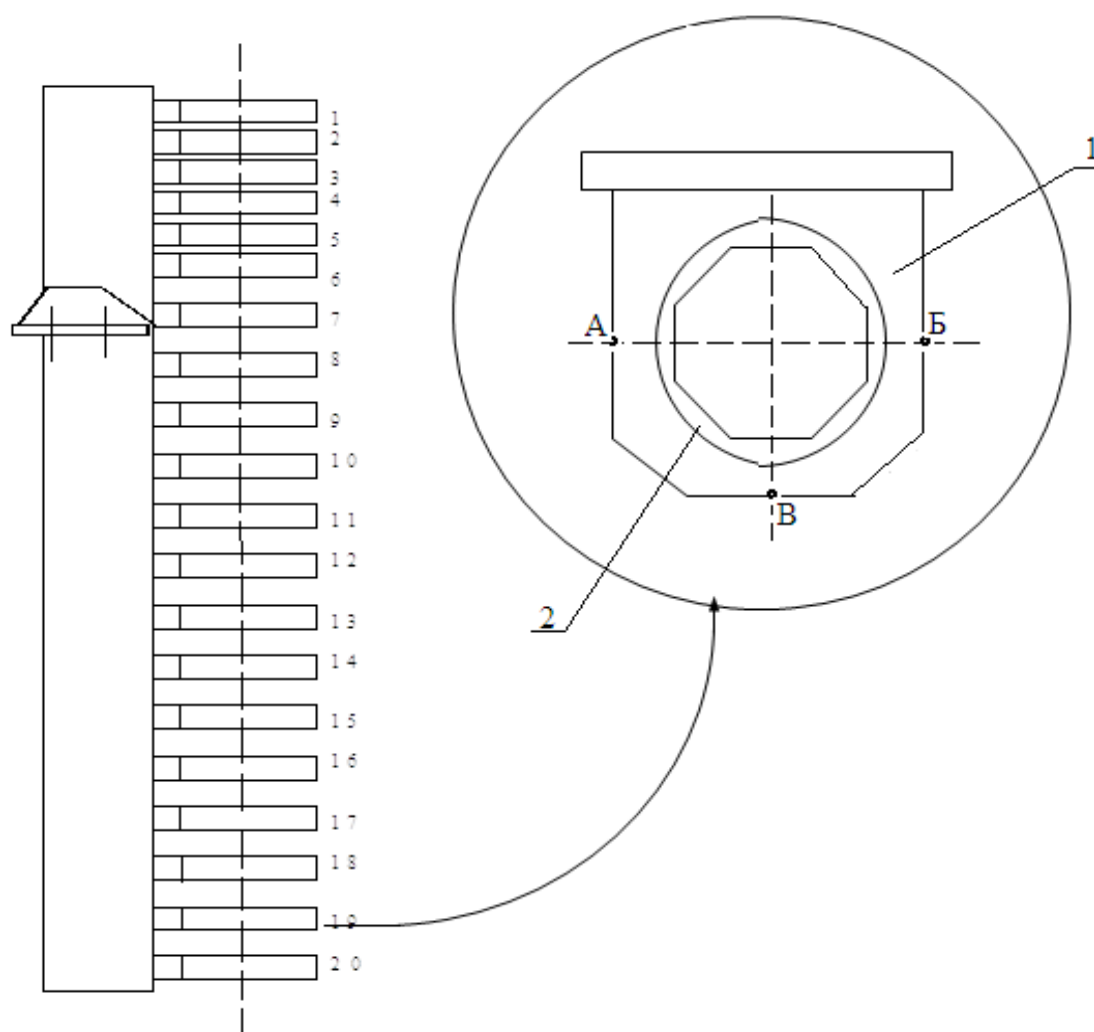


Рисунок 2 – Схема устройства стапеля (1 – стальная консоль; 2 – пластиковая вставка с центральным отверстием правильной шестигранной формы) [Berth layout (1 – steel console; 2 – plastic insert with a central hole of regular hexagonal shape)]

ГЕОМЕТРИЯ СТАПЕЛЯ И ТРЕБОВАНИЯ К НЕЙ

Стапель представляет собой стальную раму, в поперечном сечении прямоугольной формы, с приспособлениями для крепления 20-ти кронштейнов. Каждый кронштейн имеет пластиковую вставку, сквозное внутреннее отверстие которой имеет форму правильного шестигранника. Номинальное расстояние между противоположными сторонами шестигранника составляет 235,5 мм. Форма сквозного отверстия, пластиковой вставки, последнего 20-го кронштейна – окружность диаметром 195 мм. Общая длина стапеля составляет 4,351 м. Он крепится на уровне седьмого кронштейна при помощи консолей (четырьмя

юстировочными болтами) к системе металлических балок, опирающихся на стальные конструкции стеллажа чехлов ТВС установленного в УСТ.

Технические требования, предъявляемые к геометрии стапеля:

– величина отклонения от вертикали общей оси отверстий кронштейнов не более 0,2 мм;

– уклонение от оси любого кронштейна не более 0,2 мм;

– соосность кронштейнов контролируется калибр-имитатором 61-816730. Калибр-имитатор должен свободно проходить через все отверстия под собственным весом. Зазор между всеми плоскостями шестигранников кронштейнов и калибр-имитатором не должен превышать 0,1 мм.

Для обеспечения точности определения геометрических параметров стапеля с учетом вышеперечисленных технических требований к нему точность геодезических измерений m_i определялась в соответствии с формулой (1):

$$m_i = C \cdot \delta_{tex}, \quad (1)$$

где C – коэффициент обеспечения точности;

δ_{tex} – технологическое отклонение.

Принимая $C = 0.2$ и $\delta_{tex} = 0.2$ мм, имеем $m_i = 0.04$ мм.

Для контроля вертикальности и соосности кронштейнов предложены технологии измерений, которые позволяют достичь требуемую точность и учесть специфику данного вида работ.

КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИИ СТАПЕЛЯ ПРИ ЕГО МОНТАЖЕ.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ОСИ СТАПЕЛЯ

Данная технология контроля основана на использовании прибора вертикального проектирования PZL-100, технические характеристики которого приведены в таблице 1, и компарированной стальной линейке.

На первом этапе приближенно определяют ось стапеля и положение ее проекции на полах УСТ. Для этого при помощи лазерного прибора вертикального проектирования типа *Limca*, проецированием его лазерного луча от граней верхних кронштейнов, регистрируют положение шести симметрично расположенных точек на полах спецкорпуса. Пересечение линий, соединяющих противоположащие точки, дают приближенное положение проекции оси стапеля.

Таблица 1 – Технические характеристики PZL-100 [Technical characteristics of PZL-100]

№ п/п	Технические характеристики	Параметры
1	Увеличение зрительной трубы, крат	31.5
2	Расстояние наименьшего визирования, м	2.2
3	Цена деления цилиндрического уровня,	8
4	Пределы работы компенсатора,	±8
5	Точность самоустановки компенсатора,	±2
6	Максимальное расстояние вертикального проектирования, м	100
7	Относительная ошибка вертикального проектирования	1:100 000

Над этой точкой устанавливают PZL-100 и приводят его в рабочее положение.

На втором этапе определяют положение каждого кронштейна относительно приближенной оси стапеля, которая совпадает с вертикальной визирной осью прибора. Для этого линейку устанавливалась горизонтально и перпендикулярно каждой грани шестиугольника, и по ней берут отсчеты (рис. 3).

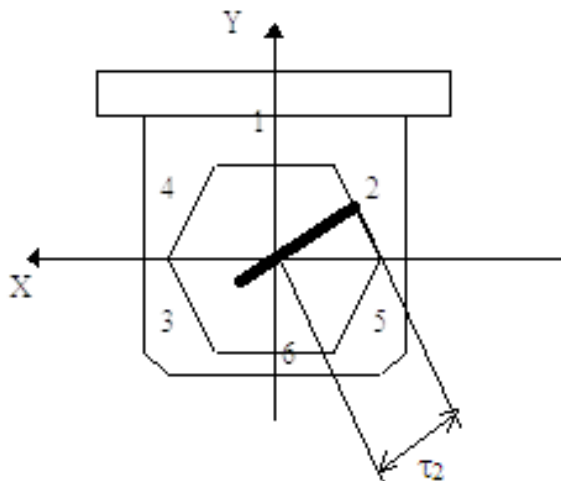


Рисунок 3 – Схема последовательности установки линейки к каждой из граней
[Installation sequence layout to each of sides]

Программа наблюдений заключалась во взятии по линейке двух отсчетов τ_o , τ_{180} . Перед вторым взятием отсчета τ_{180} прибор поворачивался на 180° . За итоговый результат принимают (2):

$$\tau_{cp} = (\tau_o + \tau_{180})/2, \quad (2)$$

где τ_{cp} – средний из двух отсчетов, свободный от ошибки за недокомпенсацию угла наклона прибора, то есть соответствующий вертикальному положению визирного луча.

Линейку устанавливают к каждой из шести граней. Один прием составляют измерения, выполненные по линейке при ее установке ко всем шести граням. Последовательность установки пронумерована цифрами на рисунке 3. Для получения требуемой точности наблюдений на каждом кронштейне производят измерения четырьмя приемами (3):

$$m_i = \frac{m_{cp}}{n}, \quad (3)$$

где m_{cp} – средняя квадратическая ошибка одного приема измерений;
 n – общее количество приемов измерений.

Принимая $m_{cp} = 0.1$ мм и $n = 4$, получим $m_i = 0.025$ мм.

По сумме средних значений отсчетов противоположных граней 1-6, 2-3 и 4-5 (рис. 3) определяют значение внутреннего расстояния между смежными плоскостями граней (4):

$$\begin{aligned} l_{1-6} &= \tau_{cp1} + \tau_{cp6}, \\ l_{2-3} &= \tau_{cp2} + \tau_{cp3}, \\ l_{4-5} &= \tau_{cp4} + \tau_{cp5}. \end{aligned} \quad (4)$$

Полученные расстояния сравнивались со значениями, определенными микрометром-нутромером, например, НМ 50-600-0.01ЧИЗ, что являлось контролем измерений:

$$\Delta l_{1-6} = l_{1-6(PZL)} - l_{1-6(нутр)} ,$$

где $l_{1-6(PZL)}$ – измерение размера выполнено PZL;

$l_{1-6(нутр)}$ – измерение размера выполнено нутромером.

Измерения считают качественными, если $\Delta l_{1-6} \leq 0.05$ мм.

Реализация данной технологии контроля позволяет определить отклонение от вертикального положения оси стапеля и несоосность кронштейнов. Обработка результатов измерений осуществляется следующим порядком. Первоначально вычисляют отклонение каждого кронштейна от вертикальной визирной оси прибора:

$$\Delta X_j = \overline{\tau_2 + \tau_5 - \Delta \tau_{1-6}},$$

где $\Delta \tau_{1-6} = \tau_1 - (l_{1-6}/2)$,

$$\Delta Y_j = \tau_1,$$

где j – номер кронштейна.

Параметры неперпендикулярности оси стапеля вычислялись в соответствии с нижеприведенными формулами (5):

$$\begin{aligned} \delta_x &= \Delta X_1 - \Delta X_{19} , \\ \delta_y &= \Delta Y_1 - \Delta Y_{19} , \end{aligned} \quad (5)$$

$$\delta_{\text{стап}} = \overline{\delta_x^2 + \delta_y^2} .$$

Параметры несоосности кронштейнов определяются по формулам (6):

$$\begin{aligned} \delta_{xj} &= \Delta X_j - \Delta X_{19} - \delta_x \cdot \frac{L_{19-j}}{L_{19-1}} , \\ \delta_{yj} &= \Delta Y_j - \Delta Y_{19} - \delta_y \cdot \frac{L_{19-j}}{L_{19-1}} , \end{aligned} \quad (6)$$

где δ_{xj} , δ_{yj} – отклонения по соответствующим направлениям оси j кронштейна от оси стапеля;

L_{19-j}, L_{1-19} – расстояния соответственно от 19-го кронштейна до исследуемого и от девятнадцатого до первого.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРЕЦИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ СТАПЕЛЯ

В предлагаемой технологии контроля применялся специальный штатив, с двухкоординатным столиком и индикаторами часового типа (рис. 4), самоцентрирующейся маркой, с нанесенной на ней двух координатной системой штрихов (рис. 5), и прибор вертикального проектирования PZL-100.

Двух координатный столик имел две степени свободы, позволяющий перемещать столик в ортогональных направлениях в горизонтальной плоскости. При

помощи индикаторов часового типа 1 и 2 (рис. 4) с точностью 0.01мм контролируют величины перемещения столика по этим направлениям.

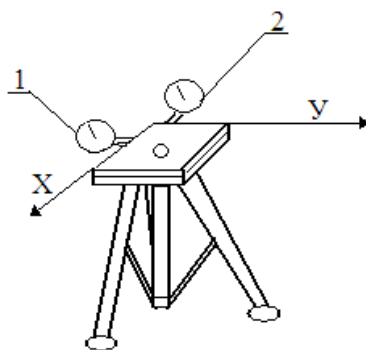


Рисунок 4 – Схема двух-координатного столика [Two-positioning stage layout]

На двух координатном столике, установленном над проекцией приближенной оси стапеля, крепился PZL-100.

Марка при помощи металлической обоймы, представляющей собой массивное кольцо, диаметр которого примерно равен расстоянию между противоположными плоскостями шестигранника консоли, устанавливают в пластиковой вставке кронштейна. На краях кольца имеются три стопорных винта, которые закрепляют марку в отверстии консоли.

Первоначально, марку устанавливают на первом кронштейне (вверху). Винтами столика совмещают центр марки с визирной осью прибора и берут два отсчета по индикаторам часового типа, например, вдоль оси X, соответственно при двух положениях прибора 0 и 180°. Затем по той же схеме берут отсчеты по оси Y.

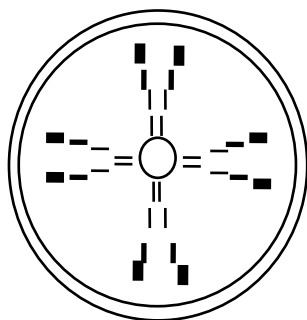


Рисунок 5 – Схема штриховой маски визирной марки [Target mark line mask layout]

Далее устанавливают марку на нижней (19-ой) консоли и берут отсчеты по индикаторам последовательно по двум осям X и Y. По разности отсчетов верхней и нижней консолей получают отклонение от вертикального положения стапеля. Не вертикальность устраняется при помощи юстировочных болтов стапеля, реализуя методику последовательных приближений с обязательным контролем оси стапеля на каждом шаге приближения по вышеописанной методике.

Несоосность кронштейнов определялась путем выполнения вычислений по результатам последнего цикла измерений (6).

После устранения неvertикальности оси стапеля и доводки положения каждого кронштейна выполняют проверку стапеля калибр-имитатором, путем прохождения его через все отверстия кронштейнов под собственным весом.

Плоскостность граней пластиковых вставок кронштейнов контролируются боковыми поверхностями калибр-имитатора методикой контактного пятна.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРЕЦИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ СТАПЕЛЯ НА СТАДИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Согласно руководящему документу (РД ЭО 1.1.2.99.0624-2011) на стадии эксплуатации АС выполняют мониторинг технического состояния строительные конструкции зданий и сооружений блоков не реже чем один раз в четыре года [6]. Однако при сейсмозодействии обследование должно выполняться незамедлительно. При этом к сейсмозодействию следует относить все сейсмические события, происходящие в регионе, волновое воздействие от которых на здания и сооружения блока превышают один бал шкалы Рихтера.

Исходя из конструктивного решения основным контролируемым параметром для стапеля является его вертикальность, при этом соосность кронштейнов не может быть изменена сейсмозодействием на строительные конструкции спецкорпуса. Для решения задачи контроля вертикальности оси стапеля предлагается использовать лазерный трекер, например, Vintag фирмы Faro, технические характеристики которого позволяют обеспечить необходимую точность контроля [7 - 12].

Методика применения трекера заключается в том, что предварительно консоли стапеля размечаются, для чего на внешних боковых гранях кронштейнов определяются и маркируется поперечная ось симметрии (рис. 2). Затем на отмеченных осях симметрии каждой боковой поверхности консоли А, Б, В (рис. 2) соосно, клеятся металлические шайбы, диаметр внутреннего отверстия которых 10.6 мм, толщина 2 мм, ширина 20 мм, а верхний габарит шайбы совмещают с отметкой верхней габаритной плоскости кронштейна. Далее, установив измерительную машину на станции в удобном месте помещения УСТ примерно на расстоянии 2-6 метров от стапеля, выполняют ее прогрев, и далее, в системе координат машины, без ее начального ориентирования, выполняют измерение координат марок на сторонах А, Б, В 19-той консоли. По полученным координатам, решая обратные геодезические задачи, определяют расстояния между точками $S_{(A-B)}$, $S_{(A-B)}$ и углы ориентирования $\alpha_{(A-B)}$, $\alpha_{(A-B)}$.

По вычисленным параметрам, определяют координаты марок в системе координат выверяемого стапеля, и при этом принимают для 19 кронштейна:

$$\begin{aligned} X_{A19} &= 0, Y_{A19} = 0; \\ X_{B19} &= 0, Y_{B19} = S_{(A-B)}; \\ X_{B19} &= S_{(A-B)} \cdot \sin(\alpha_{(A-B)} - \alpha_{(A-B)}), Y_{B19} = S_{(A-B)} \cdot \cos(\alpha_{(A-B)} - \alpha_{(A-B)}). \end{aligned}$$

Затем выполняют ориентирование измерительной машины в заданной координатной системе трех точек. Далее формируют файл (сеанс) новых измерений и выполняют все измерительные процедуры по консолям, на которые имеется прямая видимость, например, 18, 17, 16, ..., 9, 8.

По результатам измерений вычисляют величину продольного и поперечного крена стапеля:

$$\begin{aligned} \delta_X &= \frac{X_{Aj} - X_{A19}}{L_{19-j}} \cdot L_{19-1}, \\ \gamma &= \frac{Y_{Bj} - Y_{B19}}{L_{19-j}} \cdot L_{19-1}. \end{aligned} \quad (7)$$

Общий крен стапеля вычисляется по формуле (5). Сравнив полученную величину с допустимой (0.2 мм), формируют рекомендации о необходимости рихтовки пространственного положения вертикальной оси стапеля и о величине этой

рихтовки. Таким образом, поддерживается постоянная эксплуатационная пригодности стапеля-калибратора ТВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2242713 Российская Федерация. Автоматизированный стенд контроля прямолинейности подвесок [Текст] / Хорошилов В.С.; опубл. 27.12.2001, Бюл. № 36.
2. Пимшин, Ю.И. Контурные построения при контроле геометрических параметров соосности элементов технологического оборудования [Текст] / Ю.И. Пимшин, С.М. Бурдаков, Г.А. Наumenko, Ю.А. Псарёв // Глобальная ядерная безопасность. – 2018. – № 4 (29). – С. 40.
3. Пимшин, Ю.И. Контроль геометрии стапеля (калибратора тепловыделяющих сборок) [Текст] / Ю.И. Пимшин, В.Н. Шаров, В.П. Глухов // Прикладная геодезия / РГСУ. – Ростов-на-Дону, 1999. С. 5-14. – Деп. ВИНТИ 7.04.99, №1058-B99.
4. ГОСТ 25346-2013 (ISO 286-1:2010). Межгосударственный стандарт. Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки (введен в действие Приказом Росстандарта от 18.02.2014 N 28-ст) [Текст]. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 37 с.
5. ГОСТ 2.308-2011. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Указания допусков формы и расположения поверхностей. (введен в действие Приказом Росстандарта от 03.08.2011 N 211-ст) [Текст]. – Москва : Стандартинформ, 2012. – 25 с.
6. РД ЭО 1.1.2.99.0624-2011 Руководящий документ эксплуатирующей организации. Мониторинг строительных конструкций атомных станций [Текст]. – Москва, 2011.
7. Пимшин, Ю.И. Калибровка станков с числовым программным управлением с помощью лазерного трекера VINTAG [Электронный ресурс] / Ю.И. Пимшин, Ю.В. Заяров, С.М. Бурдаков, Г.А. Наumenko, Л.В. Постой // Электронный научный журнал Инженерный вестник Дона : сетевой журн. – 2016. – № 3. – URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3667> (дата обращения: 10.12.2016).
8. Пимшин, Ю.И. Применение лазерного трекера для определения деформационных характеристик защитных оболочек [Электронный ресурс] / Ю.И. Пимшин, О.А. Губеладзе, Е.Б. Ключин, Ю.В. Заяров, В.А. Наугольнов, Д.М. Арсеньев // Безопасность ядерной энергетики : тез. докл. XI междунар. научн.-практ. конф. Волгодонск, 27-29 мая 2015 г. ВИТИ НИЯУ МИФИ. – Волгодонск : [б.и.], 2015. – 1 электрон. опт. диск [CD]. – ISBN 978-5-7262-2114-4.
9. Полянский, А.В. Разработка методики геодезического обеспечения строительства и эксплуатации ускорительно-накопительного комплекса на основе гармонического анализа : автореф. дис. канд. техн. наук. [Текст] / А.В. Полянский. – Новосибирск, 2015. – 24 с.
10. Буренков, Д.Б. Разработка методики геодезического контроля изготовления и установки элементов ускорительно-накопительных комплексов с использованием API Laser Tracker 3 : автореф. дис. канд. техн. наук. [Текст] / Д.Б. Буренков. – Новосибирск, 2016. – 24 с.
11. Gurov S., Levichev E., Neyfeld V., Okunev I., Petrov V., Polyansky A. et al. Status of NSLS-II 54 booster. [Электронный ресурс]. – Сайт международных конференций (JACOW (www.JACoW.org)) – URL:<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/PAC2011/papers/wep201.pdf> – 10.12.2016.
12. Bokov M., Burenkov D., Polyanskiy A., Pupkov Yu. and Levashov Yu. Results of Long-term Observations of Deformations of the VEPP-4 Storage Ring Constructions, BINP. [Электронный ресурс]. 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering Nottingham. – United Kingdom, 28 June – 1 July 2004. – 1 электрон. опт. диск [CD].

REFERENCES

- [1] Pat. 2242713. Rossijskaya Federaciya. Avtomatizirovannyj stend kontrolya pryamolinejnosti podvesok [Pat. 2242713 Russian Federation. Automated Stand for Control of Suspension Straightness]. Xoroshilov V.S. Publ. 27.12.2001. Byul. № 36 (in Russian).
- [2] Pimshin Yu.I., Burdakov S.M., Naumenko G.A., Psaryov Yu.A. Konturnye postroeniya pri kontrole geometricheskix parametrov soosnosti elementov texnologicheskogo oborudovaniya [Contour Construction in the Geometric Parameters Control of the Alignment of Technological Equipment Elements] Global'naya yadernaya bezopasnost'. [Global nuclear safety]. 2018. № 4 (29). P. 40 (in Russian).

- [3] Pimshin Yu.I., Sharov V.N., Gluxov V.P. Kontrol' geometrii stapelya (kalibratora teplovy`delyayushhix sborok) [Inspection of The Berth (Fuel Assembly Calibrator) Geometry]. Prikladnaya geodeziya. Rost. Gos. Stroj. Un-t. Rostov-na-Donu [Applied Geodesy. RSSU.Rostov-on-Don], 1999. P. 5-14. Dep VINITI 7.04.99, №1058-V99 (in Russian).
- [4] GOST 25346-2013 (ISO 286-1:2010). Mezhhgosudarstvenny`j standart. Osnovny`e normy` vzaimozamenyaemosti. Karakteristiki izdelij geometricheskie. Sistema dopuskov na linejny`e razmery`. Osnovny`e polozheniya, dopuski, otkloneniya i posadki. (vveden v dejstvie Prikazom Rosstandarta ot 18.02.2014 N 28-st). [Interstate Standard. Basic Standards of Interchangeability. Geometric Product Characteristics. Linear Tolerance System. The Main Provisions, Tolerances, Deviations and Fit. (entered by the Order of Rosstandart, February 18, 2014 No. 28-st)]. Moscow. Standardinform. 2014.37 p. (in Russian).
- [5] GOST 2.308-2011. Edinaya sistema konstruktorskoj dokumentacii (ESKD). Ukazaniya dopuskov formy` i raspolozheniya poverxnostej. (vveden v dejstvie Prikazom Rosstandarta ot 03.08.2011. N 211-st) [Unified System for Design Documentation (ESKD). Indication of Tolerances of Shape and Location of Surfaces. (entered by the Order of Rosstandart, August 3. 2011. No. 211-st)]. Moscow : Standardinform. 2014. 25 p. (in Russian).
- [6] RD E`O 1.1.2.99.0624-2011 Rukovodyashhij dokument e`kspluatiruyushhej organizacii. Monitoring stroitel`ny`x konstrukcij atomny`x stancij. [Guidance Document of Operating Organization. Monitoring of Building Structures of Nuclear Power Plants]. Moskow. 2011 (in Russian).
- [7] Pimshin Yu.I., Zayarov Yu.V., Burdakov S.M., Naumenko G.A., Postoj L.V. Kalibrovka stankov s chislovy`m programmny`m upravleniem s pomoshh`yu lazernogo trekera VINTAG [Calibration of Machine Tools with Numerical Control Using VINTAG Laser Tracker] // E`lektronny`j nauchny`j zhurnal Inzhenerny`j vestnik Dona: setevoj zhurn. ["Engineering Bulletin of the Don" Electronic Scientific Journal: network journal]. 2016. №3. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3667> (in Russian).
- [8] Pimshin Yu.I., Gubeladze O.A., Klyushin E.B., Zayarov Yu.V., Naugol`nov V.A., Arsen`ev D.M. Primenenie lazernogo trekera dlya opredeleniya deformacionny`x karakteristik zashhitny`x obolochek [Application of Laser Tracker for Determining the Deformation Characteristics of Protective Shells]. Bezopasnost` yadernoj e`nergetiki : tez. dokl. XI mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. [Safety of Nuclear Energy: reports of the XI International Scientific and Practical Conference]. May 27-29.2015. Volgodonsk. ВИТИ НИЯУ МИФИ. Волгодонск: [б.и.], 2015. 1 электрон. опт. диск [CD] [NRNU VITI MEPhI. Volgodonsk, 2015. 1 CD] ISBN 978-5-7262-2114-4 (in Russian).
- [9] Polyansky, A.V. Razrabotka metodiki geodezicheskogo obespecheniya stroitel`stva i e`kspluatatsii uskoritel`no-nakopitel`nogo kompleksa na osnove garmonicheskogo analiza: avtoref. dis. kand. texn. nauk. [Development of Methodology for Geodetic Support for the Construction and Operation of Accelerator-Storage Complex Based on Harmonic Analysis: thesis abstract of PhD in Engineering]. Novosibirsk [Novosibirsk]. 2015. 24 p. (in Russian).
- [10] Burenkov, D.B. Razrabotka metodiki geodezicheskogo kontrolya izgotovleniya i ustanovki e`lementov uskoritel`no-nakopitel`ny`x kompleksov s ispol`zovaniem API Laser Tracker 3: avtoref. dis. kand. texn. nauk. [Development of Methods for Geodetic Control of Manufacturing and Installation of Accelerator-Storage Complexes Elements Using API Laser Tracker 3: thesis abstract of PhD in Engineering]. Novosibirsk. 2016. 24 p. (in Russian).
- [11] Gurov S., Levichev E., Neyfeld V., Okunev I., Petrov V., Polyansky A. et al. Status of NSLS-II 54 booster. Сайт международных конференций [International Conference Site]. (JACOW (www.JACoW.org)). URL : <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/PAC2011/papers/wep201.pdf> (in Russian).
- [12] Bokov M., Burenkov D., Polyanskiy A., Pupkov Yu. and Levashov Yu. Results of Long-term Observations of Deformations of the VEPP-4 Storage Ring Constructions, BINP. 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering Nottingham. – United Kingdom, 28 June – 1 July 2004. – 1 электрон. опт. диск [CD] [1 CD].

Monitoring of Berth-Calibrator Geometrical Parameters of Fuel Assembly at Nuclear Power Stations

Y.I. Pimshin ^{*1}, G.A. Naumenko ^{**2}, Yu.A. Psarev ^{**3},

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

¹ORCID: 0000-0001-6610-8725

WoS ResearcherID: J-6791-2017

e-mail: YIPimshin@mephi.ru

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

²ORCID: 0000-0002-7512-4687

WoSResearcherID: J-7170-2017

e-mail: galishka@mail.ru

³ORCID iD: 0000-0002-8609-3687

WoS Researcher ID: P-2357-20

e-mail: psarev161@gmail.com

Abstract – The paper considers the methods of monitoring the geometric parameters of the berth-calibrator of fuel assemblies (FA) used in the WWER-1000 reactor to form a controlled nuclear reaction and to obtain thermal energy. Variants of technology monitoring are implemented under the assumption of fuel assemblies for their installation in the reactor at the stage of the nuclear power plant installation and its operation.

Keywords: nuclear power plant, fuel assembly, control measurements, alignment, location, measurement error, measuring instrument.

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.039.5

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НЕЙТРОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ПРОИЗВОДСТВА WESTINGHOUSE И ТВЭЛ
ДЛЯ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР-1000 ПО КОДУ SERPENT**

© 2019 М.А. Абу Сондос, В.М. Демин, А.Д. Смирнов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В этой работе проанализировано воздействие на изотопный состав отработавшего ядерного топлива реакторов ВВЭР-1000 различных эксплуатационных условий, таких как концентрация борной кислоты, растворенной в воде, температура топлива и других. Другим фактором влияния являются технические характеристики, реализуемые при производстве топливных сборок, в частности масса топлива, его обогащение и другие массово-габаритные характеристики тепловыделяющих сборок (ТВС). Расчеты проводились на моделях топливных сборок реактора ВВЭР-1000. За основу были взяты типичные топливные сборки российских поставщиков ТВЭЛ и новые топливные сборки американской компании Westinghouse.

Ключевые слова: Serpent, ТВС-А, ТВС-WR, ВВЭР-1000, ОЯТ и эксплуатационные условия.

Поступила в редакцию 25.03.2019

После доработки 26.04.2019

Принята к публикации 17.05.2019

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время оператор украинских АЭС компания «Энергоатом» планирует отдать под загрузку американского топлива Westinghouse шесть энергоблоков на Украине – два на Южно-Украинской АЭС и четыре на Запорожской АЭС. В середине июня 2016 г. началась загрузка ядерного топлива ТВС-WR компании Westinghouse в активную зону реактора пятого энергоблока Запорожской АЭС – крупнейшего энергетического объекта на Украине. Первую партию топлива Westinghouse туда доставили в феврале. Ранее топливо Westinghouse было загружено на два блока Южно-Украинской АЭС.

В настоящей работе проведено сравнение российских ТВС компании ТВЭЛ [1-4] и топливных сборок компании Westinghouse [5] с точки зрения контроля и хранения отработавшего топлива. Существенные с точки зрения безопасности характеристики отработавшего топлива определяются главным образом изотопным составом, образующимся при выгорании топлива. Количественное определение изотопного состава отработавшего топлива требуется для решения задач, связанных с:

- 1) учетом и контролем количества опасного ядерного материала;
- 2) определением исходных условий при анализе тепловой и радиационной безопасности;
- 3) использованием выгорания в качестве параметра при обосновании ядерной безопасности систем управления отработавшим топливом.

Изотопный состав отработавшего топлива определяется не только уровнем его выгорания, но и теми условиями или, точнее говоря, спектром нейтронов, при котором происходили процессы выгорания [6, 7]. В зависимости от указанного спектра нейтронов ОЯТ с той же глубиной выгорания может иметь различный изотопный состав. Чем жестче был спектр нейтронов, тем больше U-238 участвует в процессе

выгорания (главным образом в реакциях захвата с образованием Pu-239), и тем больше U-235 остается в отработавшем топливе при одинаковом уровне выгорания [8].

В данной работе были рассчитаны концентрации изотопного состава отработавшего топлива ВВЭР-1000 разного производства при различных условиях эксплуатации: массы топлива и его обогащения, концентрации борной кислоты, растворенной в замедлителе, плотности воды и температуры топлива. Соответствующие операционные параметры представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Операционные параметры, которые использовались при выполнении расчета изотопного состава ОЯТ [Operational parameters used in the calculation of the SNF isotopic composition]

Параметр	Среднее	Макс.	Мин.
Обогащение (мас.%)	TBC -A: 306*4,4%+6*3,6% (BA) TBC-WR:240*4,2%+60*3,9%+6*3,6%+6*3,0% _(BA)	+0,5 +0,5	-0,5 -0,5
Вес топливо (кг / TBC)	TBC -A:497,9 / TBC -WR:552,8	+(4,8)/(5,3)	-(4,8)/(5,3)
Концентрация борной кислоты (ppm)	525	1050	0
Плотность воды (г / см ³)	0,72	0,74	0,7
Температура топлива. (Grad K)	1050	1100	900

На рисунках 1 и 2 и в таблице 2 представлены параметры топливных сборок TBC-A и TBC-WR [2-5].

Таблица 2 – Основные различия в геометрических и материальных параметрах TBC-A и TBC-WR [The main differences in the geometric and material parameters FA-A and FA-WR]

Параметр	TBC-A	TBC-WR
Длина топливного элемента, мм	3530	3530
Масса (UO ₂), кг	497,9±4,8	552,8±5,3
Количество тепловыделяющих элементов 312/TBC		
Внутренний / Наружный диаметр топливной таблетки, мм	1,4/7,57	-/7,84
Внутренний / Наружный диаметр оболочки, мм	7,73/9,1	8,0/9,14
Материал оболочки/ плотность (г / см ³)	сплав Э110 / 6,45	сплав ZIRLOTM / 6,55
Центральная трубка		
Внутренний / Наружный диаметр, мм	11,0/13,0	11,0/12,6
Материал / плотность (г / см ³)	сплав Э635 / 6,45	сплав ZIRLOTM / 6,55
Направляющая трубка (18 шт.)		
Внутренний / Наружный диаметр, мм	10,9/12,6	11,0/12,6
Материал / плотность (г / см ³)	сплав Э635	сплав ZIRLOTM

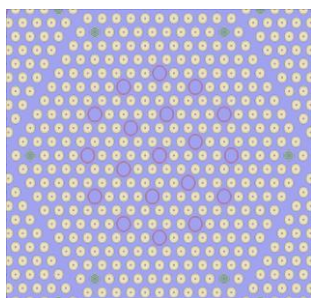


Рисунок 1 – Модель TBC-A [FA-A Model]

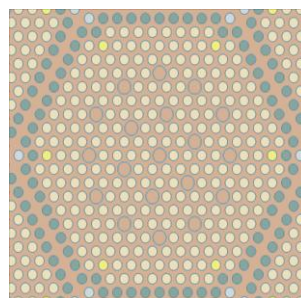


Рисунок 1 – Модель TBC-WR [FA-WR Model]

Расчеты изотопного состава отработанных топливных сборок ВВЭР-1000 проводились с использованием программного комплекса Serpent (Версия 2.1.28) [9] и библиотеки ядерных данных ENDFB7 [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчеты проводились на моделях топливных сборок ВВЭР-1000 до глубины выгорания 50 МВт.сут/кгU, что соответствует примерно четырехлетнему топливному циклу (1361,84 дня). Средняя мощность ТВС за все время работы и для всех вариантов расчетов составляла 166 Вт/см.

Результаты расчетов коэффициента размножения нейтронов $K_{эфф}$ в зависимости от глубины выгорания для средних рабочих условных (колонка Ав., табл. 1) показано на рисунке 3.

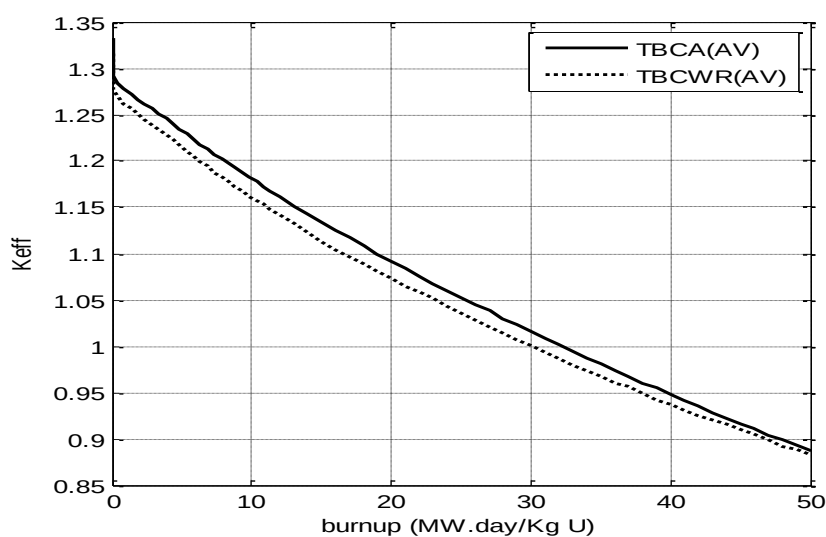


Рисунок 3 – Зависимость $K_{эфф}$ от глубины выгорания [$K_{эфф}$ dependence on burnout depth]

Несмотря на больший объем топлива (552,8 против 497,9 кг), ТВС-WR Westinghouse имеет более низкие значения коэффициента размножения нейтронов $K_{эфф}$ по сравнению с ТВС-A компании ТВЭЛ. Очевидно, это связано с более низким средним обогащением топлива ТВС-WR (табл. 1). Также заметно, что разница между двумя значениями в течение первых двух с половиной лет (до выгорания 31 МВт.сут/КгU) была постоянной (приблизительно 0,02), на третьем году она стала равной 0,015, а во время четвертого года быстро уменьшилась до 0,005.

Аналогично работе [11] для сравнения двух производителей ТВС выбраны параметры, играющие важную роль в оценке ядерной и радиационной безопасности при эксплуатации свежего и хранении отработавшего топлива, а именно активность, остаточное выделение тепла, а также концентрация ряда изотопов U, Pu, Cs и Eu.

Предварительно сформированы диапазоны исходных данных для каждого выбранного параметра, к которым относятся характеристики топливной сборки и эксплуатационные данные (табл. 1). Диапазоны включают максимальные (колонка Макс. в табл. 1) и минимальные (колонка Мин. в табл. 1) значения рассматриваемого параметра относительно средней величины (колонка Среднее в табл. 1). Соответствующие результаты представлены на рисунках 4-12. В таблице 3 представлены отношения различных результатов с разными исходными данными для разных производителей и отношение между ними при средних показателях.

Таблица 3 – Изменения параметров для ТВС-А и ТВС-WR [Parameter changes for FA-A and FA-WR]

Набор параметров	ТВС-А		ТВС-WR		ТВС-WR/ТВС-А (Среднее)
	Макс./Сред.	Макс./Мин.	Макс./Сред.	Макс./Мин.	
Концентрация U235	1,4	2,0	1,4	2,0	1,0
Концентрация U236	1,1	1,2	1,1	1,3	1,1
Концентрация Pu239	1,1	1,2	1,1	1,2	1,2
Концентрация Pu	1,0	1,1	1,0	1,1	1,2
Концентрация Eu154	1,0	1,1	1,0	1,1	1,2
Концентрация Cs134	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1
Концентрация Cs	1,0	1,1	1,0	1,1	1,1
Остаточная теплота	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1
Активность	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1

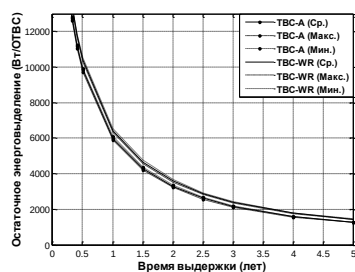


Рисунок 4 – Остаточное энерговыделения в зависимости от времени выдержки [Residual energy release depending on the exposure time]

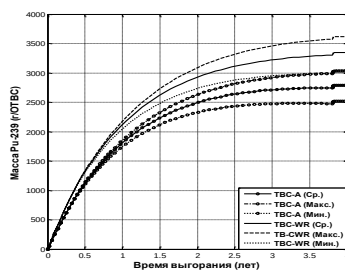
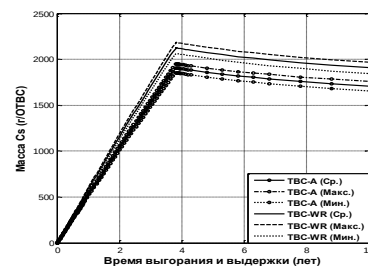
Рисунок 7 – Масса ^{239}Pu при эксплуатации [^{239}Pu weight during operation]

Рисунок 10 – Масса Cs при эксплуатации и хранении [Cs mass during operation and storage]

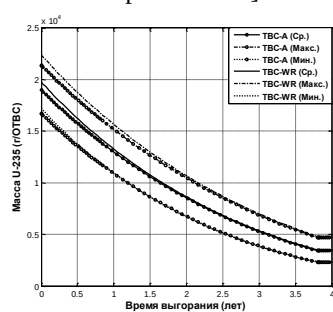
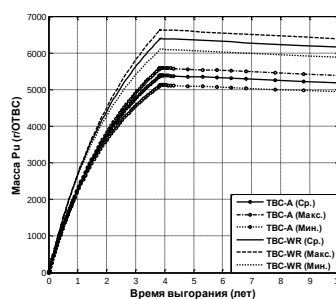
Рисунок 5 – Масса ^{235}U при эксплуатации [^{235}U weight during operation]

Рисунок 8 – Масса Pu при эксплуатации и хранении [Pu mass during operation and storage]

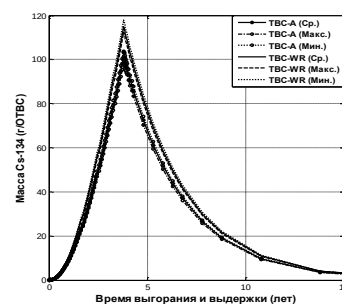
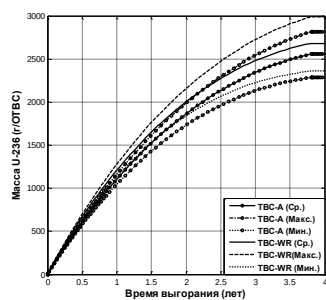
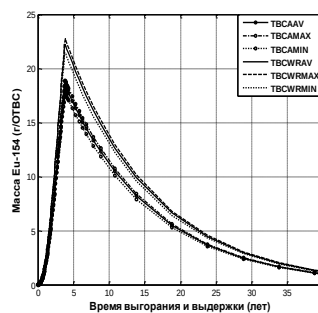
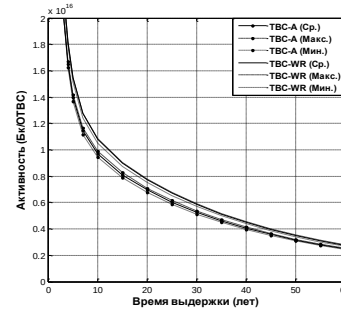
Рисунок 11 – Масса ^{134}Cs при эксплуатации и хранении [^{134}Cs mass during operation and storage]Рисунок 6 – Масса ^{236}U при эксплуатации [^{236}U weight during operation]Рисунок 9 – Масса ^{154}Eu при эксплуатации и хранении [^{154}Eu mass during operation and storage]

Рисунок 12 – Активность ОЯТ в зависимости от времени выдержки [SNF activity depending on the exposure time]

Представленные концентрации изотопов рассчитывались на момент выгрузки топлива из зоны реактора (при выгорании 50 МВт·сут./кгU), а остаточное тепловыделение и активность рассчитывались через 3 года охлаждения в бассейне выдержки.

ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде всего следует отметить, что при том же выгорании ТВС-WR (Westinghouse) имеют более низкие значения коэффициента размножения нейтронов $K_{эфф}$ относительно ТВС-А. Это означает, что в нормальных и аварийных условиях эксплуатации имеются дополнительные границы безопасности.

С другой стороны отметим, что значения $K_{эфф}$ для двух моделей приближаются друг к другу на четвертом году эксплуатации (после глубины выгорания почти в 40 МВт·сут./кг U), что обусловлено непрерывностью процесса выгорания в обеих моделях, несмотря на разницу в топливной массе и среднем обогащении разных производителей.

Путем сравнения результатов в таблице 3, можно отметить, что для всех изотопов изменения их концентраций из-за изменения условий эксплуатации в обеих моделях одинаковы. А сравнение концентраций изотопов в ТВС-WR и ТВС-А при одном условии эксплуатации (среднее) показывает, что изменение концентрации U между ними незначительно, а из-за разной топливной массы концентрация продуктов деления и Pu в ТВС-WR больше, чем в ТВС-А.

Из представленных результатов необходимо отметить немного более высокое остаточное тепловыделение и активность в ТВС-WR (Westinghouse) по сравнению с ТВС-А (ТВЭЛ) после 3 лет выдержки, что связано с концентрацией продуктов деления. Это может вызвать необходимость в немного более продолжительном охлаждении топлива после работы в бассейне с отработавшим топливом. Это может потребовать немного более длительного времени для хранения отработавшего топлива ТВС-WR (Westinghouse) в бассейне выдержки.

ВЫВОДЫ

В целом полученные результаты позволяют сделать вывод, что с точки зрения безопасного управления и хранения отработавшего топлива, возможно, использовать альтернативное ядерное топливо компании Westinghouse для реакторов ВВЭР-1000. Дополнительной модификации для него не требуется. Различия характеристик отработавших топливных сборок ТВС-А (ТВЭЛ) и ТВС-WR (Westinghouse) меньше, чем различия некоторых характеристик одного из них в зависимости от изменения условий эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Летч Т., Халимончек. В., Кучин А. (2009) «Предложение эталона для расчетов выгорания активной зоны для активной зоны реактора ВВЭР-1000». Мюнхен, 2009.
2. Летч Т., Халимончек. В., Кучин А. (2010) «Исправления и дополнения к предложению эталона для расчетов выгорания активной зоны для реактора ВВЭР-1000». Мюнхен, 2010. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/131/41131407.pdf
3. Летч Т., Халимончек. В., Кучин А. (2011) «Решения задачи 1 и задачи 2 эталона для расчета выгорания активной зоны реактора ВВЭР-1000». Мюнхен, 2011. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/105/42105721.pdf
4. Ковбасенко, Ю.В. Сравнительный анализ возможностей отработавшего топлива ВВЭР-1000 Westinghouse и ТВЭЛ [Текст] / Ю.В. Ковбасенко // Univers J Phys Appl. – № 10 (4). – С. 105-109. DOI: 10.13189/ujpa.2016.100401
5. Мировые ядерные Новости Энергоатом планирует использовать топливо Westinghouse в Запорожье, Лондон (11 ноября 2015 г.) ISSN 2040-5766. URL: <http://www.world-nuclear->

- news.org/UF-Energoatom-plans-use-of-Westinghouse-fuel-at-Zaporozhe-11111501.html (дата обращения: 20.12.2015).
6. Шидранк, П. Влияние эксплуатационных условий на изотопный состав отработавшего топлива реактора ВВЭР-440 [Текст] / П. Шидранк, В. Нашас // Инт. Конф. 7-9 июня 2011 Tatraské Matliare ENERGY – Ecol. – Экономический. – 2011. – Высокие Татры, Словацкая Республика. Словацкий Унив. Технология. Bratislava, Fac. Electr. Инженер. Бесконечность. Технология. Отдел. Nucl. Физический. С. 7-10.
 7. Шнайдер, Е.А. Вычислительно простая модель определения зависящего от времени спектрального потока нейтронов в активной зоне ядерного реактора. [Текст] / Е.А. Шнайдер, М.Р. Дейнерт, К.Б. Каду // Журнал ядерных материалов. – 2006. – Т. 357. – Вып. 1-3. – С. 19-30. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2006.04.012.
 8. Ковбасенко, Ю. Сравнительный анализ изотопного состава отработавшего топлива ВВЭР-1000 в зависимости от условий производства и эксплуатации [Текст] / Ю. Ковбасенко, Ю. Билодид, М. Еременко // 7-й межд. Конф. Nucl. Критический. Безопасность. Токай-Мура. – С. 661-665.
 9. Липаннен, Дж выступление Дельта-отслеживание вальдшнепа в применение физики решетку с помощью змея физики реакторов методом Монте-Карло выгорания код расчета, летописи атомной энергии. – 2010. – Вып. 5. – С. 715-722. DOI: 10.1016/j.анусен.2010.01.011
 10. Чедвик, М.Б. ENDF/B-VII.1 ядерные данные для науки и техники : сечения, ковариации, выходы продуктов деления и данные распада [Текст] / М.Б. Чедвик, М. Herman, П. Облозенску // Ядерные Паспорта. – 2011. – Т. 112. – С. 2887-2996. DOI: 10.1016/j.nds.2011.11.002.
 11. Новак, О. ВВЭР 1000 Хмельницкий бенчмарк-анализ, рассчитанный Serpent2, Annals of Nuclear Energy. [Текст] / О. Новак, О. Чвала, Н.П. Лучано, Г.И. Мальдонадо // Serpent2, Annals of Nuclear Energy. – 2017. – Т. 110. – С. 948-957. DOI: 10.1016/j.анусен.2017.08.011.

REFERENCES

- [1] Lötsch T., Khalimonchuk V., Kuchin A. (2009). Proposal of a benchmark for core burnup calculations for a VVER-1000 reactor core. Munich, 2009.
- [2] Lötsch T., Khalimonchuk V., Kuchin A. (2010). Corrections and additions to the proposal of a benchmark for core burnup calculations for a VVER-1000 reactor. Munich, 2010.
- [3] Lötsch T., Khalimonchuk V., Kuchin A. (2011). Solutions for the task 1 and task 2 of the benchmark for core burnup calculations for a VVER-1000 reactor. Munich, 2011.
- [4] Kovbasenko Y. Sravnitel'ny'j analiz vozmozhnostej otrabotavshego topliva VVE'R-1000 Westinghouse i TVE'L [Comparative Analysis of WVER-1000 Westinghouse and TVEL Spent Fuel Capability]. Univers J Phys Appl 10(4), P. 105-109. DOI: 10.13189/ujpa.2016.100401 (in Russian).
- [5] Mirovy'e yaderny'e Novosti E'nergoatom planiruet ispol'zovat' toplivo Westinghouse v Zaporozh'e [World Nuclear News Energoatom Plans Use of Westinghouse Fuel at Zaporozhe] London. 11 November 2015 ISSN 2040-5766. URL: <http://www.world-nuclear-news.org/UF-Energoatom-plans-use-of-Westinghouse-fuel-at-Zaporozhe-11111501.html> (in Russian).
- [6] Čudrnák P., Nečas V. Vliyanie e'kspluatacionny'x uslovij na izotopny'j sostav otrabotavshego topliva reaktora VVE'R-440 [Impact of the Operatinal Conditions on the Isotopic Composition of WVER-440 Reactor Spent Fuel] Int. Konf. 7-9 iyunya 2011 Tatraské Matliare ENERGY – Ecol. – E'konomicheskij [International Conference June 7-9, 2011 Tatraské Matliare ENERGY – Ecol. – Economics] 2011 High Tatra, Slovak Republic. Slovak Univ. Technol. Bratislava, Fac. Electr. Eng. Inf. Technol. Dep. Nucl. Phy. P. 7-10 (in Russian).
- [7] Schneider E.A., Deinert M.R., Cady K.B. Vy'chislitel'no prostaya model' opredeleniya zavisyashhego ot vremeni spektral'nogo potoka nejtronov v aktivnoj zone yadernogo reaktora [Computationally Simple Model for Determining the Time Dependent Spectral Neutron Flux in Nuclear Reactor Core]. Zhurnal yaderny'x materialov [Journal of Nuclear Materials]. 2006. Vol. 357. Issue1-3. P. 19-30. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2006.04.012 (in Russian).
- [8] Kovbasenko Y., Bilodid Y., Yeremenko M. Sravnitel'ny'j analiz izotopnogo sostava otrabotavshego topliva VVE'R-1000 v zavisimosti ot uslovij proizvodstva i e'kspluatatsii [Comparative Analysis of Isotope Composition of WVER-1000 Spent Fuel Depending on their Manufactory and Operation Conditions]. 7-j mezhd. Konf. Nucl. Kriticheskij. Bezopasnost' [7th International Conference Nucl Crit. Safety]. Tokai-mura. P. 661-665 (in Russian).
- [9] Leppänen J. Vy'stuplenie Del'ta-otslezhivanie val'dshnepa v primenenie fiziki reshetku s pomoshh'yu zmeya fiziki reaktorov metodom Monte-Karlo vy'goraniya kod rascheta, letopisi atomnoj e'nergii [Performance of Woodcock Delta-Tracking in Lattice Physics Application Using

- the Serpent Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code, *Annals of Nuclear Energy* 2010. Vol. 37. Issue 5. P. 715-722. DOI: 10.1016/j.anucene.2010.01.011 (in Russian).
- [10] Chadwick MB., Herman M., Obložinský P. ENDF/B-VII.1 yaderny`e dannyye dlya nauki i tekhniki : secheniya, kovariatsii, vy`xody` produktov deleniya i dannyye raspada [ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data] Yaderny`e Pasporta [Nuclear Data Sheets]. 2011. Vol.112. P. 2887-2996. DOI: 10.1016/j.nds.2011.11.002 (in Russian).
- [11] Novak O., Chvala O., Luciano N. P. Xmel`niczkij benchmark-analiz, rasschitanny`j Serpent2, *Annals of Nuclear Energy* [WVER 1000 Khmelnitskiy Benchmark Analysis Calculated by Serpent2, *Annals of Nuclear Energy*] 2017. Vol. 110. P. 948-957. DOI: 10.1016/j.anucene.2017.08.011 (in Russian).

Comparative Analysis of Neutrons Properties of Nuclear Fuel Produced by Westinghouse and Fuel Element for WVER-1000 Reactors by code SERPENT

M.A. Abu Sondas¹, V.M. Demin², A. D. Smirnov³

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

¹ORCID ID: 0000-0003-3954-151X

Wos Researcher ID: E-2735-2019

e-mail: MAbusondos@mephi.ru

²ORCID ID: 0000-0003-3894-9396

Wos Researcher ID: E-2750-2019

e-mail: VMDemin@mephi.ru

³ORCID ID: 0000-0001-6381-8780

Wos Researcher ID: E-3089-2019

e-mail: ADSmirnov@mephi.ru

Abstract –The paper analyzes the impact of spent nuclear fuel of WVER-1000 reactors of various operating conditions, such as the concentration of boric acid dissolved in water, the temperature of the fuel and others on the isotopic composition. Another factor of influence is the technical characteristics implemented in the production of fuel assemblies, in particular the mass of fuel, its enrichment and other mass-dimensional characteristics of fuel assemblies (FA). Calculations are carried out on models of fuel assemblies of the WVER-1000 reactor. The basis was taken of a typical fuel assembly of the Russian suppliers of fuel elements and fuel assembly of the Westinghouse American company.

Keywords: Serpent, FA-A, FA-WR, VVER-1000, SNF, operational conditions.

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

УДК 621.039.7(470)

**НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ФИНАЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ
РАДИАЦИОННЫХ ОТХОДОВ В РОССИИ**

© 2018 Г.С. Зиновьев *, В.С. Чембура **

**Новоуральский технологический институт НИЯУ МИФИ, Новоуральск, Свердловская область, Россия*

***Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия*

Данная работа посвящена изучению состояния и исследованию проблем обращения с радиоактивными отходами (РАО). Особое внимание уделено вопросам финальной изоляции радиоактивных отходов на примере пункта приповерхностного захоронения радиоактивных отходов отделения «Новоуральское» филиала «Северский» «Национального оператора по обращению с радиоактивными отходами» (НО РАО) в городе Новоуральске Свердловской области. Проведено исследование безопасности и экологичности технологий, применяемых на предприятии. Основными методами исследования являлись изучение экспертного мнения, опросы общественного мнения, в частности студентов высшего и среднего профессионального образования Новоуральского технологического института НИЯУ МИФИ, а также их сравнительный анализ. Предложены рекомендации по повышению культуры населения в вопросах использования ядерных технологий.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, обращение с РАО, финальная изоляция РАО, национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами, приповерхностный пункт захоронения радиоактивных отходов.

Поступила в редакцию 12.04.2019

После доработки 13.05.2019

Принята к публикации 24.05.2019

ВВЕДЕНИЕ

Атомная энергетика на сегодняшний день является для человечества одним из наиболее перспективных источников электрической энергии, ядерные технологии успешно используются в медицине, технике, сельском хозяйстве, научных исследованиях. И в перспективе именно ядерная энергия позволит открыть принципиально новые возможности развития человечества [1].

Отличительная особенность атомной энергетики заключается в том, что путем использования сравнительно небольшого количества топлива удастся вырабатывать колоссальное количество энергии [2]. Однако, как и в большинстве отраслей промышленности, производство электроэнергии влечет за собой возникновение техногенных отходов. В нашем случае большинство из них являются радиоактивными, которые из-за содержания в них радионуклидов нельзя безопасно ни уничтожить, ни захоронить [3]. Поэтому для такого рода отходов требуется специальное обращение, которое позволит обеспечить безопасность для здоровья человека и минимизировать воздействие ионизирующего излучения на окружающую среду [2].

Радиоактивные отходы имеют различную природу образования. Основными видами деятельности в области использования атомной энергии, в процессе которых неизбежно происходит образование РАО, являются [4]:

- вывод из эксплуатации объектов использования атомной энергии и реабилитация территорий;
- переработка отработавшего ядерного топлива (ОЯТ);
- сублиматные и разделительные производства;
- использование ядерных материалов (ЯМ) и источников ионизирующих излучений;
- объекты предприятий ядерно-топливного цикла (ЯТЦ), суда с ядерными энергетическими установками.

Таким образом, наряду со всеми преимуществами использования энергии атома существуют и некоторые недостатки, связанные, прежде всего, с нераспространением ядерных материалов; обеспечением физической, эксплуатационной и экологической безопасности; обращением с радиоактивными отходами, как в процессе образования, так и на стадии захоронения.

Стоит отметить, что кроме радиоактивных отходов (РАО) имеются и другие не менее опасные и токсичные отходы, в отношении которых также следует проводить политику безопасного обращения. По некоторым оценкам годовой объём производимых во всем мире РАО составляет приблизительно 0,5 % от всех промышленных отходов [3]. Отличительная особенность РАО заключается в том, что со временем уровень их опасности будет снижаться до тех пор, пока они не станут полностью безопасными [2].

Безопасное обращение с РАО и отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) является, безусловно, актуальным для России, а также тех зарубежных стран, которые развивают атомную энергетику, используют источники радиоактивного излучения для научных целей, в технике, медицине и сельском хозяйстве.

Создание и развитие безопасной для человека и окружающей среды системы обращения с РАО – важная государственная задача, решение которой базируется на комплексном подходе, глубоком и всестороннем анализе и учете правовых, нормативных, научных, технических, технологических, методических, общественных и политических аспектов.

В данной работе основным предметом исследования является безопасность и экологичность подходов, применяемых при финальной изоляции (захоронении) РАО. В качестве основного метода исследования выбран сравнительный анализ экспертного и общественного мнения в отношении использования ядерных технологий. Основной исследовательский вопрос заключался в том, являются ли технологии, используемые на пункте приповерхностного захоронения радиоактивных отходов отделения «Новоуральское» филиала «Северский» «НО РАО» в городе Новоуральске Свердловской области, безопасными и экологичными.

КЛАССИФИКАЦИЯ РАО

В соответствии с российским «Законом об использовании атомной энергии» № 170-ФЗ от 21.11.1995 «радиоактивные отходы» – это «не подлежащие дальнейшему использованию материалы и вещества, а также оборудование, изделия (в том числе отработавшие источники ионизирующего излучения), содержание радионуклидов в которых превышает уровни, установленные в соответствии с критериями, установленными Правительством Российской Федерации» [5].

По агрегатному состоянию РАО классифицируют следующим образом: жидкие (ЖРО), твердые (ТРО) и газообразные (ГРО). Это позволяет упростить формирование требований и условий на различных этапах обращения с радиоактивными отходами [6].

По удельной активности ТРО разделяют на 4 категории: очень низкоактивные (ОНАО), низкоактивные (НАО), среднеактивные (САО) и высокоактивные (ВАО). В

свою очередь ЖРО подразделяют на 3 категории: низкоактивные (НАО), среднеактивные (САО) и высокоактивные (ВАО).

Радиоактивные отходы, также классифицируют на шесть классов от 1 до 6 по мере убывания опасности.

Классификация РАО в России предназначена в основном для оценки воздействия ионизирующего излучения на здоровье человека, т.е. является основой для формулирования требований по обеспечению радиационной безопасности на любых этапах обращения с отходами [6].

В федеральном законе «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» № 190-ФЗ от 11.07.2011 (с изменениями на 2 июля 2013 года) предлагается также разделять РАО на следующие виды [7]:

- удаляемые радиоактивные отходы – РАО, для которых риски, связанные с радиационным воздействием, и иные риски, а также затраты, связанные с их извлечением, последующим обращением и захоронением, не превышают рисков и затрат, связанных с их захоронением в месте нахождения;

- особые радиоактивные отходы – РАО, для которых риски, связанные с радиационным воздействием, и иные риски, а также затраты, связанные с их извлечением из пункта хранения радиоактивных отходов, последующим обращением и захоронением, превышают риски и затраты, связанные с их захоронением в месте нахождения.

Данная дифференциация помогает определить отходы, которые не имеет смысла извлекать из существующих мест хранения и перемещать в другие места для их захоронения, поскольку с этой деятельностью могут быть связаны большие радиационные риски [6].

ОБРАЩЕНИЕ С РАО НА ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОМ ЭТАПЕ

Каждая страна имеет уникальный опыт обращения с РАО, при этом очевидно, что обсуждение и обмен подобным опытом, сотрудничество в данной области – путь к повышению безопасности и укреплению доверия между государствами. Этой цели служат различные международные организации, например, авторитетное Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ), одним из учредителей и активным участником которого является наша страна.

В 2005 году Российской Федерацией была ратифицирована «Объединенная конвенция о безопасности обращения с отработавшим ядерным топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами», что стало новым этапом в развитии системы обращения с РАО.

В настоящее время законодательно регулирование обращения с РАО в России осуществляется нормами Федерального закона от 11 июля 2011 года № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами».

Одним из важнейших этапов обращения с РАО является их захоронение. В определении Федерального закона от 11 июля 2011 года № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами» «захоронение радиоактивных отходов – безопасное размещение радиоактивных отходов в пункте захоронения радиоактивных отходов без намерения их последующего извлечения». В соответствии с вышеупомянутым Федеральным законом, юридическим лицом, уполномоченным осуществлять деятельность по захоронению радиоактивных отходов и иные виды деятельности по обращению с радиоактивными отходами, является национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 марта 2012 г. N 384-р национальным оператором по обращению с

радиоактивными отходами определен ФГУП «НО РАО» [7].

Существует и другая терминология. Например, под захоронением подразумевается окончательная (финальная) изоляция РАО без намерения их повторного извлечения, хотя такая потенциальная возможность на начальном этапе эксплуатации установки большинством стран не исключается [8]. С точки зрения психологии человека термин «финальная, или окончательная, изоляция» звучит, безусловно, лучше.

Захоронение в настоящее время признано наиболее эффективным подходом на финальной стадии обращения с РАО. Большинство стран, решающих проблему РАО, сходятся во мнении, что размещение радиоактивных отходов на специализированных пунктах глубинного, приповерхностного и наземного захоронения в полной мере отвечает требованиям радиационной безопасности населения и окружающей среды. В то же время, общепринятых подходов в технологии захоронения РАО в мире пока не выработано, разные страны исследуют различные способы и методы захоронения РАО. Различия в подходах обусловлены рядом факторов, например, разным уровнем технологического развития стран, различным нормативно-правовым регулированием, особенностями климата и т.д. В настоящее время во всём мире активно исследуются возможности захоронения РАО в различных геологических формациях. Так, для захоронения высокоактивных долгоживущих и тепловыделяющих РАО и ЯО предлагается использовать следующие виды пород:

- глины (Франция, Бельгия, Швейцария),
- соляные пласты (Германия),
- кристаллические породы (Швеция, Финляндия).

А в США, например, активно исследуется возможность захоронения РАО в глубоких буровых скважинах на глубине от 3 до 5 км. В качестве альтернативы глубинному захоронению также предлагается рассматривать возможность приповерхностного хранения РАО (Нидерланды) – в надежде на то, что в будущем будут разработаны новые технологии обращения с отходами [9].

Как упоминалось ранее, радиоактивные отходы в России классифицируют также по степени опасности. Для каждого из шести классов опасности утверждён свой подход по захоронению. Так, например, для 1-го класса РАО способ захоронения заключается в финальной изоляции в пунктах глубинного захоронения с предварительной выдержкой. Для 2-го класса РАО предполагается финальная изоляция в пунктах глубинного захоронения. Для 3-го класса РАО принята финальная изоляция в пунктах приповерхностного захоронения на глубине до 100 м. Для 4-го класса РАО способ захоронения предполагает финальную изоляцию в пунктах приповерхностного захоронения на уровне земли. Для 5-го класса РАО предполагается финальная изоляция в существующих пунктах глубинного захоронения. Для 6-го класса РАО принята финальная изоляция в пунктах приповерхностного захоронения [10].

ОПЫТ ОТДЕЛЕНИЯ «НОВОУРАЛЬСКОЕ» ФИЛИАЛА «СЕРВЕРСКИЙ» «НО РАО»

На сегодняшний день в городе Новоуральске Свердловской области осуществляет деятельность первый и пока единственный в России пункт окончательной (финальной) изоляции среднеактивных короткоживущих и низкоактивных отходов 3 и 4 классов опасности – пункт приповерхностного захоронения радиоактивных отходов (ППЗРО). Объект построен АО «УЭХК» ГК «Росатом» и в 2016 г. передан для эксплуатации ФГУП «НО РАО».

«Решение о размещении пунктов ПЗРО на территории города Новоуральск было обусловлено тем, что это был один из пунктов федеральной целевой программы

«Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года», который был принят на достаточно высоком уровне. Уральский электрохимический комбинат был пионером в области проектирования и строительства пунктов захоронения для радиоактивных отходов 3 и 4 классов. В связи с этим у нас в Новоуральске появился первый пункт, который изначально был построен, потом введен в эксплуатацию, затем начал принимать радиоактивные отходы. Это решение правительства РФ» – отмечает начальник отделения «Новоуральское» филиала «Северский» «НО РАО» В.В. Александров [11].

На рисунке 1 показана схема пункта ПЗРО в г. Новоуральске [12].

В настоящее время первая очередь ПЗРО, состоящая из непосредственно хранилища (карта 10) и здания №1, в котором находится санпропускник, пункт дезактивации и пост охраны и другие сооружения первой очереди ПЗРО, введена в эксплуатацию.

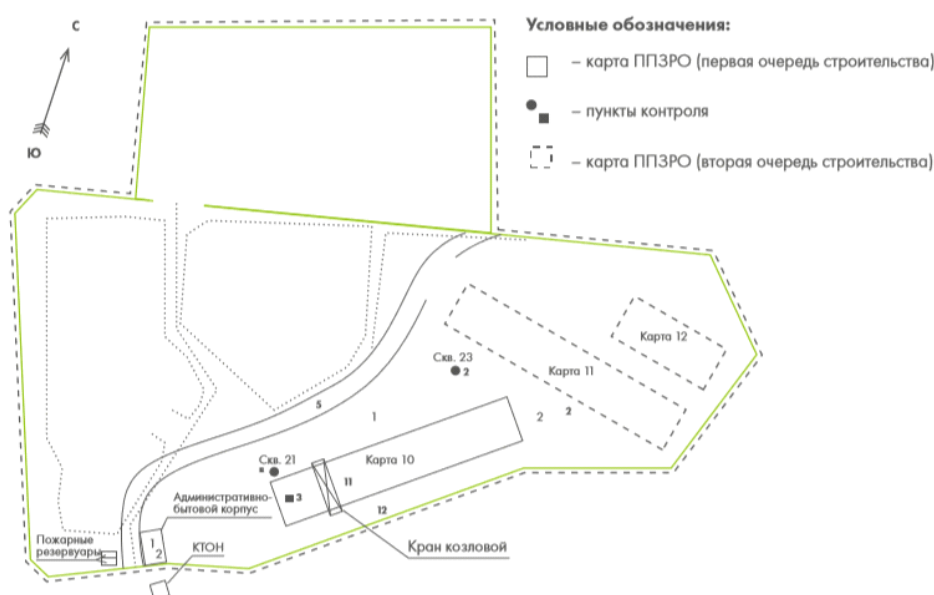


Рисунок 1 – Схема пункта ПЗРО в г. Новоуральске [Layout of near-surface disposal of radioactive waste in Novouralsk]

Карта №10 имеет габариты 140×24×7 м и представляет собой монолитное железобетонное сооружение прямоугольной формы [13].

Особенность площадки ПЗРО в г. Новоуральске заключается в том, что «именно здесь воплощены те требования по обеспечению безопасности, которые были сформулированы на современном этапе. В том числе с учетом уже имеющегося опыта на предприятиях Росатома и имеющегося опыта на предприятиях зарубежных стран» [11].

Строительству ПЗРО предшествовало широкое общественное обсуждение, в общественных слушаниях также принимали участие студенты и сотрудники Новоуральского технологического института Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (НТИ НИЯУ МИФИ). Стоит отметить, что студенты НТИ принимают непосредственное участие в реализации общественного контроля над деятельностью ПЗРО, который, в частности, осуществляет Общественная палата Новоуральского городского округа.

Сравнивая российский и зарубежный опыт в вопросах финальной изоляции РАО можно отметить, что с технической точки зрения российская система обращения с РАО базируется на колоссальном многолетнем опыте ГК «Росатом», принимает во внимание

международные и национальные практики и в этом смысле нисколько не уступает зарубежной. Законодательная и нормативная база также совершенствуется, проводится большой объем проектно-изыскательских и научно-исследовательских работ.

Это мнение подтверждают слова начальника отделения «Новоуральское» филиала «Северский» ФГУП «НО РАО» В.В. Александрова «...данный пункт [ППЗРО] безопасен не только потому, что только мы подтвердили это своими документами, но и ещё и потому что это проверил Ростехнадзор, который выдал лицензию. ФМБА также провело проверку и выдало заключение о том, что «НО РАО» соответствует всем санитарным правилам» [11].

ВАЖНОСТЬ ОБЩЕСТВЕННОГО МНЕНИЯ В ВОПРОСАХ ОБРАЩЕНИЯ С РАО

Роль общественности в функционировании объектов атомной отрасли существенно возросла и имеет законодательную основу. Поэтому работа с общественностью требует отдельного внимания. За последнюю пару лет процент населения, которое поддерживает развитие атомной энергетики в России, показывает достаточно хорошие темпы роста. Подтверждением этому служат недавние результаты опроса, проведенные «Левада-центром» среди населения России на тему отношения к атомной энергетике. Выяснилось, что почти три четверти жителей России положительно относятся к атомной энергетике в стране.

По данным опроса 73,9 процента респондентов считают необходимым активно развивать атомную энергетику или сохранить объемы атомной генерации на нынешнем уровне. При этом 50,3 процента опрошенных называют атомную энергетику «зеленым, чистым видом производства электроэнергии». Опрос проводился по репрезентативной выборке населения всех федеральных округов России. Были опрошены 4 тысячи человек в возрасте 18 лет и старше [14].

Полученные результаты опроса также прокомментировала замдиректора «Левада-центра» Людмила Хахулина – «...данные опроса не только этого года демонстрируют поддержку большинства населения атомной энергетики. В течение трех последних лет наши замеры (а мы их делаем дважды в год) показывают, что поддержка этого вида энергетики устойчиво держится на довольно высоком уровне...» [14].

Тем не менее, существенная часть населения воспринимает информацию о ядерно-радиационно-опасных объектах достаточно настороженно. Известно также, что чем ближе к объекту, тем отношении более лояльное и с большим осознанием объективных плюсов и минусов ситуации. Об этом свидетельствуют результаты опроса общественного мнения, проведенного в 2015 году по заказу концерна «Росэнергоатом» [15]. Из этого можно сделать вывод, что, если отбросить политические факторы, то в основе адекватного восприятия людьми преимуществ и рисков использования атомной энергетики, объектов атомной отрасли, источников радиоактивного излучения лежат образованность и информированность.

Отвечая на вопрос о важности общественного мнения в отношении использования ядерных технологий, начальник отделения «Новоуральское» филиала «Северский» «НО РАО» В.В. Александров отмечает следующее: «...без учета общественного мнения такие важные решения [о строительстве ППЗРО] не принимаются, у нас это на законодательном уровне прописано. При получении лицензии, а также при получении документов об экологической экспертизе мы должны провести общественные слушания. Общественные слушания проводились и, когда Уральский электрохимический комбинат получал лицензию на сооружение и когда ФГУП «НО РАО» получала лицензию на эксплуатацию первой очереди [ППЗРО]. В 2017 году прошли 2 общественных слушания о внесении изменений в условия действия

лицензии на эксплуатацию и сооружения пункта. Достаточно много встреч прошло в рамках подготовки к этим мероприятиям. Поэтому взаимодействие с общественностью показало, что у людей очень большой интерес к этому вопросу. Именно к вопросам безопасности эксплуатации данного пункта. Мы никогда не ограничиваемся только общественными слушаниями, мы также взаимодействуем с общественностью города Новоуральска в том числе и по экологическому контролю нашего пункта. Диалог ведется постоянно и в первую очередь через наш центр по взаимодействию с общественными организациями ФГУП «НО РАО» и через отделение «Новоуральское» уже здесь на местном уровне. Поэтому участие общественности в вопросах размещения, создания и эксплуатации данных пунктов самое широкое» [11].

Таким образом, на сегодняшний день эксперты оценивают степень информированности населения города Новоуральска по аспектам функционирования пункта ПЗРО на уровне выше среднего.

РЕЗУЛЬТАТЫ СОЦИОЛОГИЧЕСКОГО ОПРОСА СРЕДИ СТУДЕНТОВ

С целью изучения мнения учащейся молодежи по вопросам безопасности ядерных технологий и, в частности, отношения к пункту ПЗРО, а также общей информированности, среди учащихся высшего и среднего профессионального образования Новоуральского технологического института НИЯУ МИФИ был проведен социологический опрос.

Опрос проводился среди студентов института и колледжа НТИ НИЯУ МИФИ в возрасте от 17 до 26 лет. Всего в опросе приняли участие 152 респондента, в том числе 72 студента колледжа и 80 студентов института. На рисунке 2 представлены возрастные категории опрошенных студентов.

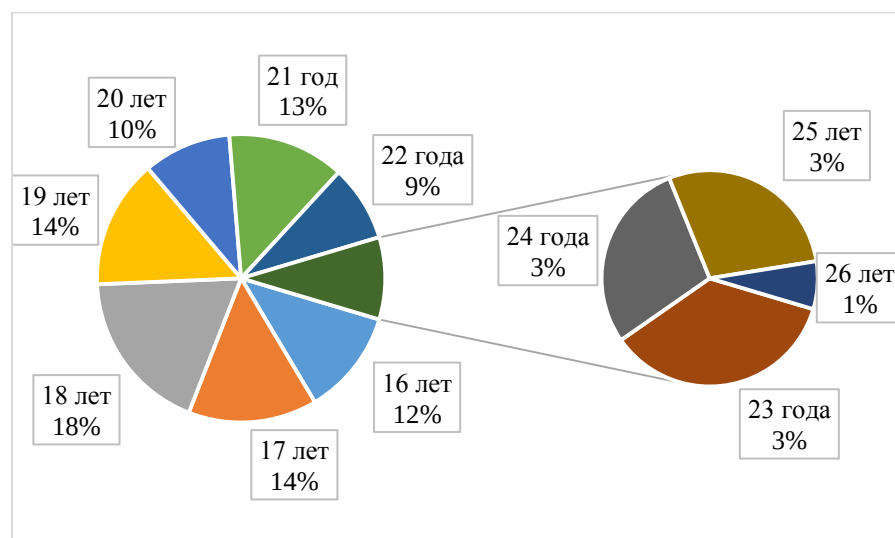


Рисунок 2 – Диаграмма распределения возраста респондентов [Diagram of respondent age distribution]

На рисунке 3 наглядно представлены результаты ответов студентов на вопрос – «Какой вид энергетики является, по Вашему мнению, самым безопасным?». Наибольший процент баллов 26% и 27% получили ветровая и солнечная энергетики соответственно. С результатом 18% на третьей позиции оказалась гидроэнергетика. На четвертом месте закрепилась теплоэнергетика с 16%. Атомная энергетика заняла только последнее место с 13%.



Рисунок 3 – Результаты опроса мнения студентов [Results of a student opinion survey]

Отвечая на вопрос – «Известно ли Вам о предприятии ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами»?» лишь только 8,55 % сообщили, что им хорошо известно о деятельности «НО РАО». Большинство респондентов либо вообще ничего не слышали о предприятии (50%), либо знакомы с ним поверхностно (41,45%). Результаты опроса по данному вопросу в графическом виде представлены на рисунке 4.

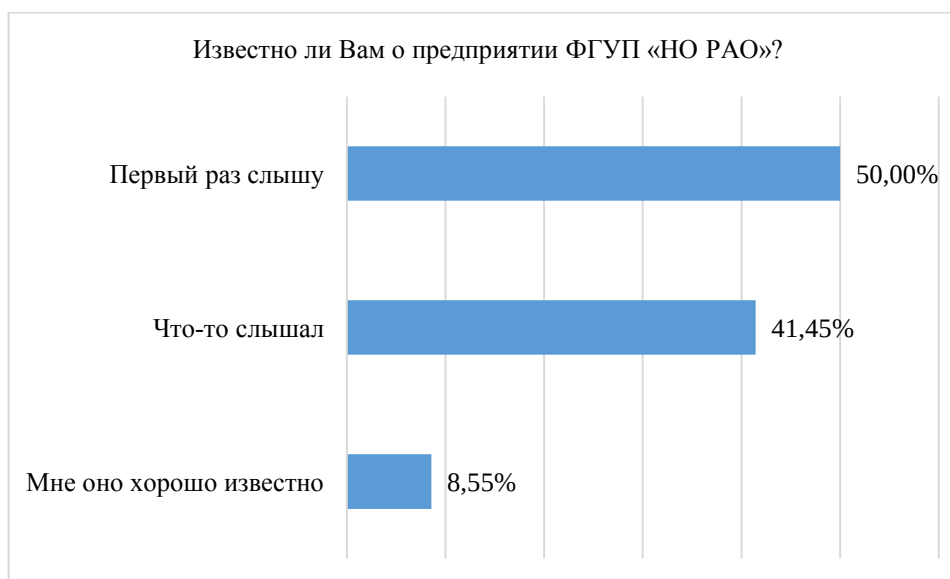


Рисунок 4 – Результаты опроса мнения студентов [Results of a student opinion survey]

На рисунке 5 представлены результаты ответов студентов института и колледжа. Только 11,25% респондентам со стороны института и 5,56% со стороны колледжа известно о деятельности «НО РАО». Процент опрошенных студентов института и колледжа, которые ничего не слышали о предприятии, не изменился и составил 50%. 44,44% студентов колледжа слабо знакомы с предприятием. Процент студентов института и колледжа знакомых с «НО РАО» поверхностно составил 38,75% и 44,44% соответственно.

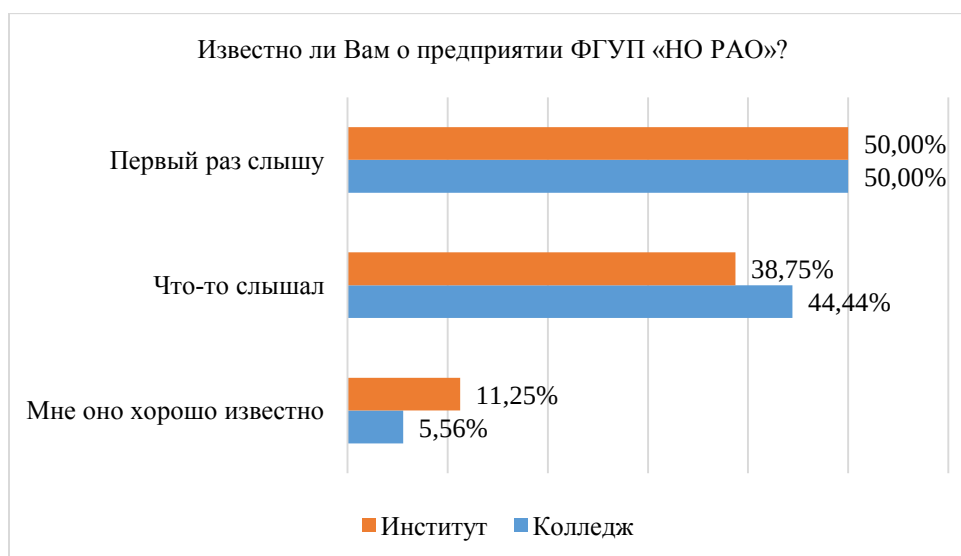


Рисунок 5 – Результаты опроса мнения студентов [Results of a student opinion survey]

Отвечая на вопрос – «Являются ли технологии, применяемые ФГУП «НО РАО» на площадке в Новоуральске безопасными и экологичными?» лишь 8,55% выразили полное доверие; 32,89% респондентов отметили, что технологии скорее безопасны, чем небезопасны. Другая часть опрошенных посчитала, что технологии скорее небезопасны (15,13%). 7,89% однозначно ответили «нет» на данный вопрос, а 35,53% студентам было трудно определиться с ответом.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволяют сделать несколько важных выводов.

Во-первых, к сожалению, отношение молодого поколения к ядерным технологиям в основном настороженное. Это может быть обусловлено как недостаточной образованностью, так и негативным информационным фоном, складывающимся вокруг атомной энергетики из-за крупных инцидентов или аварий, имевших место на предприятиях ЯТЦ. К ним, в первую очередь, можно отнести катастрофические события, происходившие в Чернобыле и на Фукусиме. После подобных событий, подкрепленных устрашающими и порой не вполне достоверными данными со стороны СМИ, у населения, вероятно, формируется базис неглубоких и обрывочных знаний, который, в дальнейшем является основой дискуссий и бесед с окружающими. В конечном итоге это приводит к распространению информации, которая провоцирует страх и настороженное отношение людей.

Во-вторых, сравнительный анализ экспертного мнения и мнения студентов показывает, что проблема недостаточного информирования населения по вопросам безопасности эксплуатации пункта ПЗРО в городе Новоуральске существует. Несмотря на регулярную работу отделения «Новоуральское» филиала «Северский» НО РАО по информированию населения, студенты слабо осведомлены о функционировании ППЗРО. Следовательно, необходима ещё большая, постоянная и кропотливая работа по повышению культуры и информированности населения в вопросах безопасного обращения РАО. Особенное внимание здесь следует уделять образованию молодого поколения: школьников и студентов. Уместно будет отметить, что процент хорошо информированных студентов НТИ уровня высшего образования о предприятии НО РАО в 2 раза больше по сравнению со студентами среднего профессионального образования. Можно предположить, что здесь существуют некоторые позитивные факторы. Можно предположить, что здесь положительное влияние оказывает то, что

некоторым специальностям студентов института читается курс «Основы и культура ядерной безопасности»; некоторые студенты участвуют в общественном контроле деятельности ППЗРО под эгидой Общественной палаты Новоуральского городского округа; часть студентов присутствовали на семинарах и встречах, проводимых с участием экспертов НО РАО и АО «УЭХК».

В-третьих, мнение студентов о безопасности и экологичности не совпадает с экспертным мнением. Лишь только 8,55% уверены в том, что эксплуатация пункта ПЗРО осуществляется по всем правилам безопасности. Как было указано выше, недостаточная информированность, а также низкий уровень знаний в данной области вероятнее всего служат причинами такого несоответствия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение культуры, уровня специальных знаний, информированности учащейся молодежи в вопросах использования ядерных технологий, и, в частности, обращения с РАО на финальной стадии, является актуальной проблемой. Для её устранения необходимо решить задачи проведения регулярной просветительской и образовательной работы среди населения.

Методы и формы такой работы могут быть различными: традиционными или новаторскими, но, если речь о молодежи, обязательно интересными и увлекательными.

Очень хорошим примером является проведение нескольких семинаров, посвященных ядерному топливному циклу, которые состоялись в феврале 2017 года в стенах НТИ НИЯУ МИФИ. Со студентами встретились представители администрации Новоуральского городского округа и ФГУП «Национальный оператор по захоронению радиоактивных отходов». Как отметил руководитель Центра общественных и международных связей ФГУП «НО РАО» Н.В. Медянцев, - «Чем больше встреч мы проводим, тем больше студентов приходит, и тем более глубокие вопросы они задают со знанием дела». В свою очередь В.В. Александров, начальник отделения «Новоуральское» филиала «Северский» ФГУП «НО РАО», обратил внимание – «Обсуждаемая сегодня тема для ребят очень интересная, новая. Я думаю, мы будем планировать дальнейшее сотрудничество с нашим институтом в части информирования и ознакомления с Новоуральским пунктом, поэтому формы общения могут быть различные» [16].

Перспективным с точки зрения работы с населением, студентами и школьниками представляется также создание совместно с ФГУП «НО РАО», АО «УЭХК» ГК «Росатом» на базе НТИ НИЯУ МИФИ «Информационно-образовательного центра ядерных технологий», основными задачами которого будут являться:

- интерактивное информирование населения города о преимуществах и уровне безопасности используемых ядерных технологий;
- вовлечение школьников и студентов города в проектную и исследовательскую работу по направлениям деятельности центра;
- проведение официальных и неформальных (например, в стиле «Atom Slam») встреч ученых университета и экспертов отрасли с населением, в том числе студентов и школьников и многое другое.

Все эти шаги, несомненно, будут способствовать повышению доверия населения к отечественной системе обращения с РАО, а также ко всей атомной отрасли в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мурогов, В.М.* Атомная энергетика сегодня. 7 фактов о перспективах развития атомной промышленности в современном мире [Электронный ресурс] / М.В. Мурогов. URL: <https://postnauka.ru/faq/14277> (дата обращения: 13.03.2019).
2. Radioactive Waste Management [Электронный ресурс]. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclearwastes/radioactive-waste-anagement.aspx> (in English).
3. Радиоэкологические аспекты обращения с РАО и ОЯТ в условиях инновационного развития ядерной энергетики [Электронный ресурс]. URL: <http://nuclear-submarine-decommissioning.ru/node/755>, Загл. с экрана. (дата обращения: 13.03.2019).
4. Четвертый национальный доклад Российской Федерации о выполнении обязательств, вытекающих из объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rosatom.ru/upload/iblock/6a1/6a10d74afc8b64b31f1c0dae05525ab8.pdf> (дата обращения: 04.03.2019).
5. Федеральный закон РФ «Об использовании атомной энергии» № 170-ФЗ (с изменениями на 3 июля 2016 года) [Электронный ресурс] / URL: <http://docs.cntd.ru/document/9014484> (дата обращения: 04.03.2019).
6. *Пронкин, Н.С.* Обеспечение безопасности хранилищ радиоактивных отходов предприятий ядерного топливного цикла: учеб. Пособие [Текст] / Н.С. Пронкин. – Москва : Логос, 2012. – 420 с.
7. Федеральный закон от 11.07.2011 N 190-ФЗ (ред. от 02.07.2013) «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_116552 (дата обращения: 11.02.2019).
8. *Линге, И.И.* Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО [Текст] / И.И. Линге [и др.] – Москва : Изд-во «Комтехпринт», 2015. – 208 с.
9. *Никитин, А.* Обращение с РАО в некоторых странах ЕС и в России. Гражданское участие (Швеция, Финляндия, Германия, Франция, Россия) [Электронный ресурс] / А. Никитин, А. Ожаровский, А. Колотов, А. Талевлин. – Санкт-Петербург : Экологическое объединение «Беллона», 2017 – URL: http://network.bellona.org/content/uploads/sites/4/2017/02/RAO_public_site.pdf (дата обращения: 11.02.2019).
10. ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами». Классы РАО [Электронный ресурс]. URL: <http://www.norao.ru/waste/classification/class> (дата обращения: 27.02.2019).
11. Интервью с начальником отделения «Новоуральское» филиала «Северский» «НО РАО» В.В. Александровым магистранта НИ ТПУ Чембура В.С. (интервьюер) от 4 апреля 2018 года [Аудиозапись беседы] // ФГУП «НО РАО», г. Новоуральск, 26 мин. 34 сек. Публикуется с согласия В.В. Александрова.
12. Отчет по экологической безопасности 2015 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rosatom.ru/upload/iblock/d4e/d4edde3e02aef7ff28d29ef1883ed18f.pdf> – 2015 (дата обращения: 04.03.2019).
13. Материалы обоснования лицензии на эксплуатацию первой очереди стационарного объекта, предназначенного для захоронения радиоактивных отходов – приповерхностного пункта захоронения твердых радиоактивных отходов, отделения «Новоуральское» филиала «Северский» ФГУП «НО РАО» (включая материалы оценки воздействия на окружающую среду) [Электронный ресурс]. URL: http://www.norao.ru/upload/МОЛ%20Новоуральск_Эксплуатация_том%201.pdf – 2017.
14. Почти три четверти россиян заявили о поддержке атомной энергетики [Электронный ресурс]. URL : <https://lenta.ru/news/2018/04/09/oprosrosatom/> (дата обращения: 09.03.2019)
15. Жители российских регионов размещения АЭС поддержали атомную энергетику [Электронный ресурс]. URL: <http://www.atomic-energy.ru/news/2015/07/27/58608> (дата обращения: 27.02.2019).
16. Студенты Новоуральска узнали о новых наработках в области обращения с радиоактивными отходами [Электронный ресурс]. URL: <https://mephi.ru/content/news/1412/121465/> (дата обращения: 17.02.2019).

REFERENCES

- [1] Murogov V.M. Atomnaya e`nergetika segodnya. 7 faktov o perspektivax razvitiya atomnoj promy`shlennosti v sovremennom mire [Nuclear Power Today. 7 Facts on the Prospects for the nuclear Industry Development in the Modern World]. URL: <https://postnauka.ru/faq/14277>. 2013 (in Russian).
- [2] Radioactive Waste Management. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclearwastes/radioactive-waste-management.aspx>. 2017 (in English).
- [3] Radioe`kologicheskie aspekty` obrashheniya s RAO i OYaT v usloviyax innovacionnogo razvitiya yadernoj e`nergetiki [Radioecological Aspects of Management of Radioactive Waste and SNF in Conditions of Innovative Development of Nuclear Power]. URL: <http://nuclear-submarine-decommissioning.ru/node/755> (in Russian).
- [4] Chetverty`j nacional`ny`j doklad Rossijskoj Federacii o vy`polnenii obyazatel`stv, vy`tekayushhix iz ob`edinennoj konvencii o bezopasnosti obrashheniya s otrabotavshim toplivom i o bezopasnosti obrashheniya s radioaktivny`mi otxodami [The Fourth National Report of the Russian Federation on the Fulfillment of Obligations Arising from the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management]. URL: <http://www.rosatom.ru/upload/iblock/6a1/6a10d74afc8b64b31f1c0dae05525ab8.pdf> (in Russian).
- [5] Federal`ny`j zakon RF «Ob ispol`zovanii atomnoj e`nergii» № 170-FZ (s izmeneniyami na 3 iyulya 2016 goda) [Federal Law of the Russian Federation «Use of Atomic Energy» No. 170-FZ (as amended on July 3, 2016)] URL: <http://docs.cntd.ru/document/9014484> (in Russian).
- [6] Pronkin N.S. Obespechenie bezopasnosti xranilishh radioaktivny`x otxodov predpriyatij yadernogo toplivnogo cikla: ucheb. Posobie [Ensuring the Safety of Radioactive Waste Storage Facilities of Enterprises of the Nuclear Fuel Cycle: Training. Allowance]. Moscow. Logos.2012. 420 p. (in Russian).
- [7] Federal`ny`j zakon ot 11.07.2011 N 190-FZ (red. ot 02.07.2013) Ob obrashhenii s radioaktivny`mi otxodami i o vnesenii izmenenij v otdel`ny`e zakonodatel`ny`e akty` Rossijskoj Federacii [Federal Law of 11.07.2011 N 190-FZ (Edited on 02.07.2013) Management of Radioactive Waste and on the Introduction of Changes in Certain Legislative Acts of the Russian Federation]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_116552 (in Russian).
- [8] Linge I.I., Polyakov Yu. D. Obzor zarubezhny`x praktik zaxoroneniya OYaT i RAO [Review of Foreign Practices of SNF and Radioactive Waste Disposal]. Moscow. "Komtehprint" Publishing House. 2015. 208 p.
- [9] Alexander Nikitin. Treatment of radioactive waste in some EU countries and in Russia. Civic participation (Sweden, Finland, Germany, France, Russia). URL: http://network.bellona.org/content/uploads/sites/4/2017/02/RAO_public_site.pdf, 2017.(in Russian)
- [10] FGUP «Nacional`ny`j operator po obrashheniyu s radioaktivny`mi otxodami». Klassy` RAO [FSUE "National Operator for Radioactive Waste Management". Classes of RAO]. URL : <http://www.norao.ru/waste/classification/class> (in Russian).
- [11] Interview of the undergraduate student of NI TPU Chembur V.S. (interviewer) with the head of Novouralskoye branch of Seversky branch of NO RAO. Alexandrov from April 4, 2018 [Audio recording of the conversation] // FSUE "NO RAO", Novouralsk, 26 min. 34 seconds Published with the consent of V.V. Alexandrova.
- [12] Otchet po e`kologicheskoy bezopasnosti 2015 [Report on Environmental Safety 2015]. URL : <http://www.rosatom.ru/upload/iblock/d4e/d4edde3e02aef7ff28d29ef1883ed18f.pdf> (in Russian).
- [13] Materialy` obosnovaniya licenzii na e`kspluatatsiyu pervoj ocheredi stacionarnogo ob`ekta, prednaznachennogo dlya zaxoroneniya radioaktivny`x otxodov – pripoverxnostnogo punkta zaxoroneniya tverdyy`x radioaktivny`x otxodov, otdeleniya «Novoural`skoe» filiala «Severskiy» FGUP «NO RAO» (vklyuchaya materialy` ocenki vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredyu) [Materials for the Substantiation of the License for the Operation of the First Stage of a Stationary Facility Intended for the Disposal of Radioactive Waste - the Near-Surface Disposal Facility for Solid Radioactive Waste, Novouralskoye Department of the Seversky Branch of FSUE «NO RAO» (Including Environmental Impact Assessment Materials)]. URL: http://www.norao.ru/upload/MOL%20Novouralsk_Economy_tomy201.pdf (in Russian).
- [14] Pochti tri chetverti rossiyan zayavili o podderzhke atomnoj e`nergetiki [Almost Three-Quarters of Russians Expressed Support for Nuclear Power]. URL: <https://lenta.ru/news/2018/04/09/oprosrosatom> (in Russian).

- [15] Zhiteli Rossijskix regionov razmeshheniya AE`S podderzhali atomnuyu e`nergetiku [Residents of the Russian Regions of Nuclear Power Plant Location Supported Nuclear Power]. URL: <http://www.atomic.energy.ru/news/2015/07/27/58608> (in Russian).
- [16] Studenty` Novoural'ska uznali o novy`x narabotkax v oblasti obrashheniya s radioaktivny`mi otxodami [Students of Novouralsk Learned about New Developments in the Field of Radioactive Waste Management]. URL: <https://mephi.ru/content/news/1412/121465> (in Russian).

Some Aspects of Final Insulation of Radiation Wastes in Russia

G.S. Zinoviev^{*1}, V.S. Chembura^{**2}

^{*}*Novouralsk Technological Institute the branch of NRNU MEPHI, Novouralsk, Sverdlovsk Region, Russia*

^{**}*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

¹*ORCID ID: 0000-0003-0781-9425*

e-mail: GSZinovyev@mephi.ru

²*ORCID ID: 0000-0001-9028-3312*

e-mail: vadimka.holloway@mail.ru

Abstract - This paper is devoted to the study of the state and the problems of radioactive waste management (RW). Particular attention is paid to the final isolation of radioactive waste by the example of a near-surface disposal site for radioactive waste from the Novouralskoye department of the Seversky branch of the National Operator for Radioactive Waste Management (NO RW) in Novouralsk, Sverdlovsk Region. The paper carries out a study of the safety and environmental technologies used in the enterprise. The main research methods are the study of expert opinions, public opinion polls, in particular, students of higher and secondary vocational education of the Novouralsk Technological Institute of the National Research Nuclear University MEPHI as well as their comparative analysis. Recommendations for improving the culture of the population in the use of nuclear technologies are proposed.

Keywords: radioactive waste, RW management, final isolation of RW, national operator for radioactive waste management, near-surface disposal facility for radioactive waste.

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

УДК 351.862.82 : 373.5 : 621.039

**ФОРМИРОВАНИЕ КУЛЬТУРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ШКОЛЬНИКОВ
В СИСТЕМЕ ОРГАНИЗАЦИИ ОПЕРЕЖАЮЩЕЙ ПОДГОТОВКИ
КАДРОВ ДЛЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

В.А. Руденко, Н.Ф. Привалова

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

В статье раскрывается актуальность формирования культуры безопасности школьников в системе организации опережающей подготовки инженерных кадров для атомной энергетики на этапе инновационного развития отрасли; рассматриваются возможности профессиональной ориентации на специальности/направления подготовки, профильные для атомной энергетики в области формирования культуры безопасности школьников.

Ключевые слова: культура безопасности, инновационное развитие, инженерная деятельность, опережающая подготовка кадров, профессиональная ориентация.

Поступила в редакцию 29.05.2019

После доработки 03.06.2019

Принята к публикации 06.06.2019

В настоящее время основой экономической независимости России является создание и развитие инновационной высокотехнологичной экономики, которая позволит сформировать сильную производственную базу и обеспечить конкурентоспособность Российской Федерации в мире.

Инновационная экономика, как отмечает Л.Н. Орлова, обладает рядом признаков, важнейшим из которых является наличие четко налаженной гибкой системы опережающей подготовки кадров [1].

Опережающая подготовка предполагает инициирование и реализацию профессиональной подготовки кадров по новым, перспективным направлениям деятельности, реальная потребность в которых возникнет в долгосрочной перспективе [2].

Реализация опережающей профессиональной подготовки, имеющей направленность не только на сегодняшний день, но и на будущее, позволит подготовить специалистов, профессиональная компетентность которых обеспечит эффективную работу производств в условиях возрастающей конкуренции [2]. Опережающая подготовка кадров может стать ключевым механизмом, который позволит перейти к качественно новой конкурентоспособной промышленности [3].

Задачу инновационного развития национальной экономики нельзя решить без опоры на опережающее развитие, особенно в тех отраслях экономики, в которых Россия уже имеет серьезные научно-технические заделы [4], к таким областям, несомненно, относится ядерная энергетика, которая является одним из ключевых элементов атомной отрасли.

Атомная отрасль стремится быть лидером на глобальных рынках, идти на шаг впереди в технологиях и знаниях. Государственная корпорация по атомной энергии

«Росатом» (далее – ГК «Росатом») объединяет предприятия одной из наиболее высокотехнологичных отраслей промышленности, деятельность которых основана на использовании самых современных достижений.

Следует отметить, что в современном мире остро стоит вопрос энергопотребления, решением которого по ряду причин, стало активное развитие атомной отрасли. Самые сдержанные прогнозы МАГАТЭ утверждают, что к 2030 году количество введенных в эксплуатацию энергоблоков возрастет с 400 до 600 [5].

В рамках развития экспортоориентированной стратегии ГК «Росатом» осуществляет масштабную программу сооружения АЭС как в Российской Федерации, так и за рубежом. Перед Концерном по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях» (АО «Концерн Росэнергоатом», далее – Концерн) – крупнейшей энергетической компанией, владеющей и управляющей атомными электростанциями, открываются новые перспективы, основанные на том, что мировые рынки энергетики переходят к сервисно-ориентированной модели развития. Предоставление сервисных услуг на всем жизненном цикле АЭС является приоритетным направлением развития энергетических компаний [6].

Для развития атомной энергетики, обеспечения высокого уровня надежности и безопасности ядерных установок, как в России, так и на АЭС, сооружаемых за рубежом, уже сегодня существует большая потребность в специалистах высокой квалификации [5]. Однако, в атомной энергетике существует ряд серьезных проблем, ограничивающих масштабы ее развития, среди которых – кадровые проблемы. Одной из основных причин срыва сроков ввода в эксплуатацию новых энергоблоков АЭС и невозможности увеличения масштабов строительства является недостаток квалифицированных кадров [7].

В связи с этим, уделяется значительное внимание созданию эффективной системы повышения уровня квалификации и подготовки персонала для АЭС [5]. Необходимы высокопрофессиональные инженерно-технические специалисты, которые способны обеспечить безопасное, надежное и эффективное функционирование не только текущих производственных процессов в атомной энергетике, но и освоение, и развитие ядерных энергетических технологий нового поколения в перспективе.

Развитие атомной энергетики, реализация лидерских позиций в мире возможна только при условии успешного функционирования систем опережающей подготовки квалифицированных инженерных кадров. Актуальность решения этой задачи диктует необходимость выбора адекватных подходов и методик.

Как показывает мировой опыт, чтобы добиться соответствия системы подготовки инженерных кадров запросам экономики и производства, необходимо развивать в обществе инженерную культуру, повышать социальную значимость и престижность инженерных профессий, начинать выращивать профессионалов уже со школы [8].

ГК «Росатом» традиционно уделяет большое внимание развитию общего образования, популяризации естественных наук, ядерных технологий среди школьников. С 2011 года реализуется масштабная инициатива «Школа Росатома» [9]. Это школа, которая «растет» вместе с ребенком, поддерживает и развивает его с ранних лет, от детского сада и до поступления в высшее учебное заведение. Главный принцип реализации проекта – системность и работа на опережение [10].

Реализация «Программы инновационного развития и технологической модернизации Госкорпорации «Росатом» на период до 2030 года» предусматривает взаимодействие с инициативами, ориентированными на развитие общего образования в направлении популяризации науки, развития проектной научной и инженерной работы среди школьников [9].

Концерн, как энергетическая компания ГК «Росатом», заинтересован в привлечении лучших выпускников для работы на АЭС и других организациях, входящих в контур управления. Профориентационная работа Концерна начинается со школьниками. В городах присутствия АЭС созданы «атом-классы», где идет углубленное изучение физики, на их базе проводятся профильные олимпиады по физике и математике для школьников [10].

Однако, в настоящее время, учитывая потребности общества в подготовке человека к безопасной жизнедеятельности, становится очевидным тот факт, что для подготовки кадров для высокотехнологичных отраслей экономики, включая атомную энергетику, где «...безопасность является внутренней потребностью и важнейшей составляющей деятельности», не может ограничиваться только образовательными мероприятиями в области естественно-научных дисциплин. Появилась и утверждается потребность обучения субъектов труда безопасному для себя и окружающих поведению [11].

В педагогической теории и практике ведется поиск путей и средств воспитания культуры безопасности [12]. Наряду с традиционными подходами к воспитанию – личностно-ориентированным, деятельностным, культурологическим, ценностным, гуманистическим – используют инновационный подход, формирующий личность безопасного типа [11].

Проведенный анализ источников позволяет рассматривать культуру безопасности жизнедеятельности школьников как интегральное качество личности, которое характеризуется уровнем сформированности осознанной потребности в безопасной жизнедеятельности, положительной мотивации этой деятельности, эмоционально-волевой устойчивости к преодолению опасностей, необходимых знаний по основам безопасности жизнедеятельности, практических умений по соблюдению правил безопасной жизнедеятельности. Структура культуры безопасности жизнедеятельности включает в себя мотивационно-потребностный, эмоционально-волевой, когнитивный и операционально-деятельностный компоненты, сформированность которых определяет общий уровень готовности школьников к безопасной жизнедеятельности [13].

Однако в массовой педагогической практике обучения основам безопасности жизнедеятельности осуществляется преимущественно в рамках дисциплины «Основы безопасности жизнедеятельности» и часто носит репродуктивный характер [12].

В современных образовательных реалиях наряду с обновлением содержания общего образования, также необходимо обновление содержания, методов, средств и форм профориентационной работы на основе анализа профессиональных предпочтений выпускников общеобразовательных организаций [14], особенно если в качестве профессиональных предпочтений рассматриваются профессии, требующие высокого уровня сформированности культуры безопасности, как важнейшего инструмента обеспечения безопасности отрасли [15].

В.Д. Горичева, В.П. Музыка, И.С. Сеницын рассматривая технологии формирования готовности учащихся к выбору профессии применительно к изучению основ безопасности жизнедеятельности, выделяют четыре этапа профориентационной работы, каждый из которых направлен на формирование основ культуры безопасности [14].

Первый этап предполагает первичное ознакомление с миром профессий в сфере безопасности жизнедеятельности. Одним из методов, активно используемых на данном этапе, является метод профессиографии. Составление и анализ профессиограмм способствует не только формированию представления о профессии, но и внутренней рефлексии учащегося, позволяет получить ответы на вопросы: «Подходит ли ему такой

вид деятельности?», «Обладает ли он необходимыми качествами для такой деятельности?»

Второй этап предполагает организацию для школьников профориентационных экскурсий на предприятия, связанных с обеспечением безопасности жизнедеятельности.

На третьем этапе школьники вовлекаются в деятельность, в ходе осуществления которой им предстоит принять на себя роль исполнителя выбранной профессии, что способствует приобретению первичных профессиональных умений. Особое место на данном этапе принадлежит активным методам обучения – кейсам, которые требуют от школьников применения имеющихся знаний для решения значимой для них проблемы, а также профессиональным пробам. Выполнение профессиональных проб позволяет подросткам в процессе подготовки и выполнения пробы оценить собственные возможности освоения профессии.

На заключительном этапе профориентационной работы учащимся оказывается консультативная помощь в осознании перспектив своей будущей профессиональной деятельности, а также содействие открытию школьниками для себя направлений подготовки в сфере обеспечения безопасности. Эффективными в вопросах консультирования могут стать коуч-сессии. Посредством коучинга и проектной деятельности у школьников, формируется осознание направлений профессиональной деятельности, анализируются собственные возможности, особенности, которые соотносятся с требованиями будущей профессии, то есть формируется или развивается готовность к выбору профессии и дальнейшему профессиональному образованию.

Спланированная и организованная по такой схеме профориентационная работа, с нашей точки зрения, позволит рассматривать ее в качестве раннего этапа системы опережающей подготовки кадров для атомной энергетики. Этапа, который позволит не только привлечь талантливых выпускников школ в атомную отрасль, но и сформировать у них интегральное качество – культуру безопасности жизнедеятельности.

Организация профориентации на инженерные профессии предполагают достаточно высокий уровень научной составляющей, креативность, направленность, прежде всего, на формирование системного творческого технического мышления учащихся и развитие их способности генерировать нестандартные технические идеи при решении творческих задач. Такой подход к профессиональной ориентации учащихся способствует повышению образовательного уровня, стимулирует развитие профессионально значимых личностных качеств, обеспечивает устойчивое развитие социально-профессиональной направленности, в том числе культуры безопасности жизнедеятельности.

Формирование эффективной системы выявления, поддержки и развития способностей и талантов у детей и молодежи, направленной на самоопределение и профессиональную ориентацию всех обучающихся – одна из основных задач «Национального проекта «Образование» [16].

Анализ результатов деятельности ведущих Российских вузов показал, что перспективным направлением работы в рамках ранней профессиональной ориентации школьников на инженерно-технические специальности/направления подготовки является организация и проведение летних научно-технических школ на площадке вузов [13], в рамках которых могут создаваться необходимые условия формирования культуры безопасности у школьников.

В рамках пилотного проекта на площадке Волгодонского инженерно-технического института (филиала) Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» летняя научно-техническая школа «Юные атомщики»

стартовала в 2017 году. Слушателями летней научно-технической школы «Юные атомщики» стали учащиеся 1-7 классов общеобразовательных учреждений города. Группы слушателей формировались по возрастным категориям. Модераторами, лекторами, тренерами юных слушателей были ведущие специалисты и преподаватели института [17].

Основной целью проведения летней научно-технической школы «Юные атомщики» было создание условий для формирования у школьников интереса к технической, инженерной деятельности в сфере атомной энергетики и становления индивидуальной образовательной траектории учащихся через включение их в процесс учебно-исследовательской и проектной деятельности во внеурочной среде.

При формировании дорожной карты научно-технической школы были разработаны мероприятия, которые способствовали накоплению «стартовых возможностей» школьников как будущих профессионалов атомной отрасли.

Программа научно-технической школы включала проведение экскурсий, мастер-классов, командных игр, работу над стендовыми проектами, практические и лабораторные занятия по физике, иностранному языку, встречи учащихся с ведущими учеными ВИТИ НИЯУ МИФИ и ведущими специалистами, работающими в атомной отрасли. Большое внимание было уделено занятиям по физике, поскольку эта дисциплина является базовой при подготовке специалистов, работающих в сфере атомной энергетики. Со школьниками были проведены лабораторные занятия по механике и электричеству, занимательной физике. Школьники знакомились с историей и современными достижениями, основными профессиями в атомной отрасли. В процессе занятий были созданы условия для формирования у школьников навыков самостоятельного поиска новых знаний. Обучение сочетало индивидуальные мероприятия, где каждый ребенок мог проявить и показать себя, работу в мини-группах, с командами, которые сплачивали детей и способствовали дружественной, творческой атмосфере занятий. Все мероприятия проводились на площадке ВИТИ НИЯУ МИФИ в специально оборудованных лабораториях и аудиториях.

В ходе проведения научно-технической школы осуществлялось формирование устойчивого интереса и мотивации к инженерной, технической деятельности, знакомство с основами культуры безопасности.

По завершению работы летней научно-технической школы у детей отмечен рост интереса к техническим наукам, специальностям и желание продолжить обучение в техническом вузе. Многие из слушателей поступили в технические кружки и секции, занялись научными исследованиями на кафедре физики ВИТИ НИЯУ МИФИ, успешно выступили с докладом о результатах своей работы на студенческой научной конференции.

В качестве современных активных форм в системе профориентационных мероприятий особое место занимает проект «Atomcamp», в рамках реализации которого на площадке ВИТИ НИЯУ МИФИ осуществляется развитие взаимодействия представителей института с учащимися 9-11 классов – потенциальными абитуриентами, популяризация инженерного образования, происходит «глубокое погружение» школьников в жизнь вуза и предприятий ГК «Росатом». Программа «Atomcamp» предусматривает экскурсии на производственные площадки предприятий атомной отрасли: АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, в учебно-тренировочное подразделение филиала АО «Концерн Росэнергоатом» Ростовская атомная станция; встречи на производственных площадках со специалистами в области атомной энергетики и атомного энергомашиностроения; мастер-классы на профильных кафедрах, профессиональное тестирование; ознакомление с лабораторной базой, студенческой жизнью института.

Эффективной формой профессиональной ориентации на инженерные профессии является проект «Физический марафон», который направлен на создание условий для интеллектуального развития и поддержки одаренных детей, пропаганду научных знаний, выявление и развитие творческих способностей учащихся, формирование познавательного интереса к изучению физики.

Участие в проекте способствует формированию и развитию у школьников основ культуры безопасности. В процессе работы учащиеся закрепляют правила и общие требования техники безопасности на занятиях по физике, пожарной безопасности и правила обращения с электроприборами, учатся тому, что необходимо делать при получении травмы или ухудшении состояния школьника, а также осваивают требования техники безопасности на занятиях по физике после их завершения.

Необходимо отметить, юные физики г. Волгодонска – участники марафона, становятся на ступень выше в своих знаниях по физике, на шаг ближе к своей мечте – влиться в студенческое сообщество и получить престижную профессию инженера-физика, за которым безопасное будущее атомной отрасли.

В разработке у коллектива ВИТИ НИЯУ МИФИ находится еще один профорientационный проект, имеющий областное значение – создание на базе института инновационного центра «Кванториум» (федеральная сеть детских технопарков [18]), представляющего собой новую модель дополнительного образования. Этот формат работы со школьниками ориентирован на создание условий для их вовлечения в техническую сферу деятельности, с учетом приоритетных направлений развития науки, технологий и техники Ростовской области. Типовая организационная структура «Кванториума» представлена на рисунке 1.

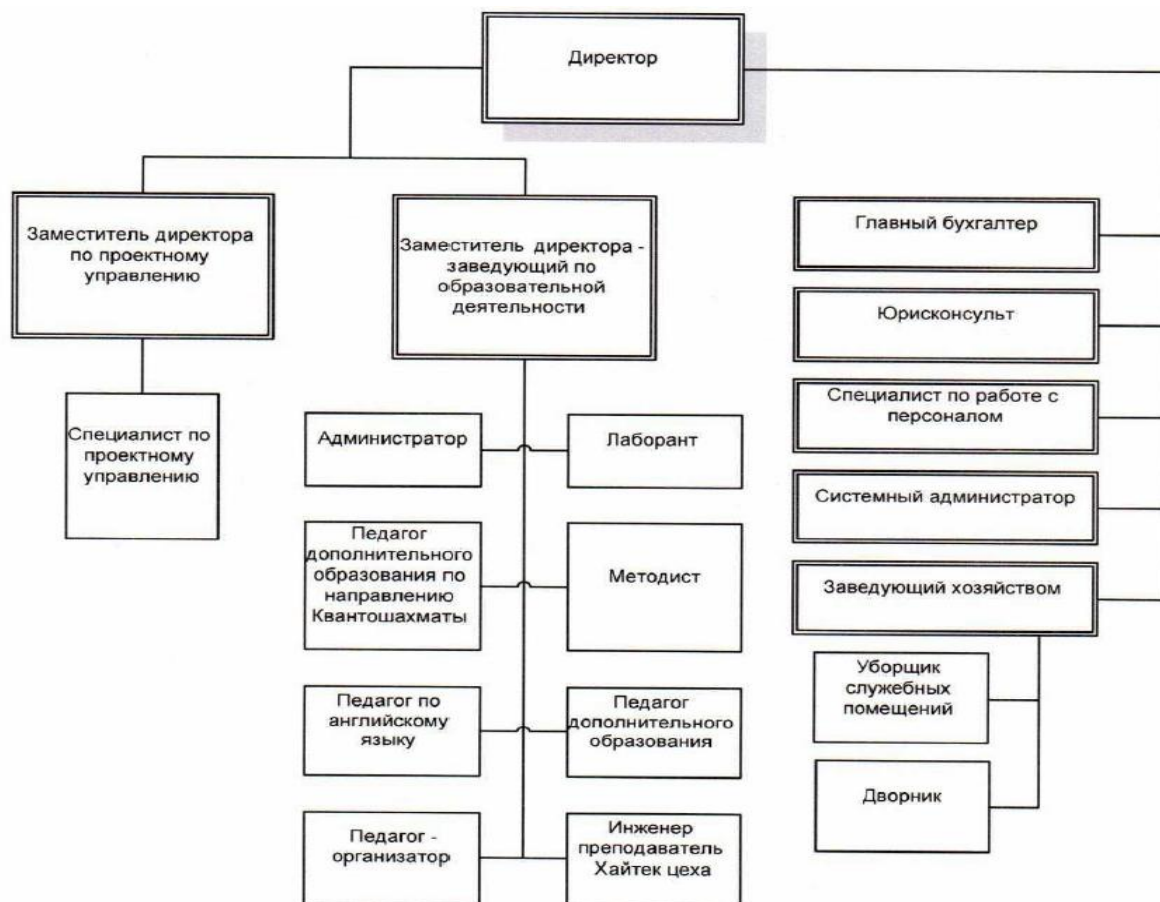


Рисунок 1 – Типовая организационная структура «Кванториума»
[«Quantorium» typical organizational structure]

Организация занятий со школьниками будет предусматривать:

- погружение в интеллектуальную среду (special soft);
- решение простых инженерных кейсов (soft skills и hard skills);
- подготовка к региональным и федеральным соревнованиям;
- подготовка к международным соревнованиям, решение углубленных кейсов и соревновательные проекты (глубокие soft skills и hard skills);
- решение глобальных технологических кейсов с новизной и уникальностью в конечном решении.

Преимуществами реализации данного проекта для вуза является привлечение наиболее подготовленных и одаренных школьников города и близлежащих районов для поступления на востребованные ГК «Росатом» специальности и направления подготовки, реализуемые в ВИТИ НИЯУ МИФИ.

Рассмотренные мероприятия в работе со школьниками предусматривают повышение качества и объема научно-популярной информации о современных проблемах атомной промышленности, формирование положительного образа профессиональной деятельности в структуре атомной отрасли, повышение привлекательности профильного инженерного образования, создают условия формирования когнитивной, деятельностной и мотивационной составляющей культуры безопасности.

Направленность атомной энергетики на инновационное развитие и лидерство в мировом пространстве требует развитие системы опережающей подготовки кадров для атомной энергетики, отбор одаренных школьников, способных к техническому творчеству и инновационному мышлению, проявляющих интерес к вопросам ядерной энергетики и высоких технологий, их ориентацию на инженерно-технические профессии для обучения в техническом вузе. Рассмотренные формы и методы работы со школьниками будут способствовать формированию культуры безопасности жизнедеятельности школьников, как одной из составляющих системы опережающей подготовки кадров для атомной отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлова, Л.Н. Инновационная экономика: факторы и противоречия развития, уровни формирования [Электронный ресурс] / Л.Н. Орлова // Интернет-журнал НАУКОВЕДЕНИЕ». – Том 7. – №2 (2015). – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/83EVN315.pdf> (дата обращения: 05.04.2019).
2. Журавлева, М.В. Гармонизация профессионального самоопределения обучающихся как условие опережающей подготовки кадров для нефтехимического комплекса [Электронный ресурс] / М.В. Журавлева // Педагогика и психология профессионального образования. – 2011. – №1. – С.13-21. URL : <https://cyberleninka.ru/article/v/garmonizatsiya-professionalnogo-samoopredeleniya-obuchayuschih-sya-kak-uslovie-operezhayuschey-podgotovki-kadrov-dlya> (дата обращения: 05.04.2019).
3. Агентство Стратегических Исследований: опережающая подготовка кадров станет механизмом перехода к новой промышленности [Электронный ресурс]. URL : <https://tass.ru/ural-news/3751204> (дата обращения: 05.04.2019).
4. Заболотько, А.А. Инновационное развитие экономики: понятие, проблемы и пути решения [Электронный ресурс] / А.А. Заболотько. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/v/innovatsionnoe-razvitie-ekonomiki-ponyatie-problemy-i-puti-resheniya> (дата обращения: 04.04.2019).
5. Виштак, Н.М. Система подготовки кадров в атомной энергетике [Электронный ресурс] / Н.М. Виштак, Т.А.Разумова, А.П. Осколков // Молодой ученый. – 2015. – №22.5. – С. 24-26. URL : <https://moluch.ru/archive/102/23622/> (дата обращения: 30.03.2019).
6. Годовой отчет АО «Концерн Росэнергоатом» за 2016. [Электронный ресурс]. – Москва, 2017. URL : <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/673/6736f56972480fdbf340ee640b0882c4.pdf> (дата обращения: 04.04.2019).

7. Камчатова, Е.Ю. Инновационный потенциал атомной энергетики. [Электронный ресурс]. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/v/innovatsionnyy-potentsial-atomnoy-energetiki> (дата обращения: 31.03.2019)
8. Колонтаевская, И.Ф. ПрофорIENTATIONная работа со школьниками для поступления на инженерно-технические направления подготовки профессионального образования [Электронный ресурс] / И.Ф. Колонтаевская // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2014. – №11 (ноябрь). – С. 111-115. URL : <http://e-koncept.ru/2014/14319.htm> (дата обращения: 30.03.2019)
9. Паспорт программы инновационного развития и технологической модернизации Госкорпорации «Росатом» на период до 2030 года (в гражданской части) [Электронный ресурс]. – Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». – Москва, 2016. – URL : <https://www.rosatom.ru/upload/iblock/5e1/5e130b6e7fba0fb511f400defad83aca> (дата обращения: 23.03.2019).
10. Проект «Школа Росатома» [Электронный ресурс]. – URL: <https://rosatom.ru/career/obrazovanie/proekt-shkola-rosatoma/> (дата обращения: 04.04.2019).
11. Маренго, А.К. Реализация непрерывного профессионального образования в формировании культуры безопасности [Электронный ресурс] / А.К. Маренго // Вестник РМАТ. – № 2. – 2016. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/realizatsiya-nepreryvnogo-professionalnogo-obrazovaniya-v-formirovani-kultury-bezopasnosti> (дата обращения: 20.05.2019).
12. Мошкин, В.Н. Воспитание культуры безопасности школьников : дис. д-ра пед. наук : 13.00.01 [Электронный ресурс] / В.Н. Мошкин. – Барнаул, 2004. – 369 с.. – URL: <http://www.dslib.net/obw-pedagogika/vospitanie-kultury-bezopasnosti-shkolnikov.html> (дата обращения: 25.05.2019).
13. Цейко, В.А. Культура безопасности жизнедеятельности старшеклассников: сущность, процесс формирования и результаты [Электронный ресурс] / В.А. Цейко. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/kultura-bezopasnosti-zhiznedeyatelnosti-starsheklassnikov-suschnost-protsess-formirovaniya-i-rezultaty> (дата обращения: 20.05.2019).
14. Горичева, В.Д. Технология формирования готовности учащихся к выбору профессии в сфере безопасности жизнедеятельности [Электронный ресурс] / В.Д. Горичева, В.П. Музыка, И.С. Синицын // Ярославский педагогический вестник. – 2017. – № 3. – С.39-44. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/tehnologiya-formirovaniya-gotovnosti-uchaschihsya-k-vyboru-professii-v-sfere-bezopasnosti-zhiznedeyatelnosti> (дата обращения: 20.05.2019).
15. Руденко, В.А. Культура безопасности в системе ценностей Госкорпорации «Росатом» [Текст] / В.А. Руденко, Н.П. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 1 (18). – С. 118-122.
16. Паспорт национального проекта «Образование» [Электронный ресурс]. URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_319308/ (дата обращения: 23.03.2019).
17. Руденко, В.А. Ранняя профессиональная ориентация в сфере атомной энергетики как фактор стратегического развития атомной отрасли [Текст] / В.А. Руденко, М.В. Головкин, Н.В. Ермолаева, Н.И. Лобковская // Глобальная ядерная безопасность. – 2018. – №4 (298). – С. 97-108.
18. О мерах по созданию детского технопарка «Кванториум» в Ростовской области (распоряжение Правительства Ростовской области № 482 от 24.08.2017)

REFERENCES

- [1] Orlova L.N. Innovacionnaya e`konomika: faktory` i protivorechiya razvitiya, urovni formirovaniya [Innovative economy: factors and contradictions of development, levels of formation] // Internet-zhurnal NAUKOVEDENIE» [Internet journal SCIENCE]. Vol 7. №2 (2015). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/83EVN315.pdf> (in Russian).
- [2] Zhuravleva M.V. Garmonizatsiya professional`nogo samoopredeleniya obuchayushchixsy kak uslovie operezhayushhej podgotovki kadrov dlya neftehimicheskogo kompleksa [The harmonization of professional self-determination of students as a condition of advanced training for the petrochemical complex] // Pedagogika i psixologiya professional`nogo obrazovaniya [Pedagogy and Psychology of Vocational Education]. 2011. №1. P. 13-21. URL : <https://cyberleninka.ru/article/v/garmonizatsiya-professionalnogo-samoopredeleniya-obuchayushchih-sya-kak-uslovie-operezhayushchey-podgotovki-kadrov-dlya> (in Russian).
- [3] Agentstvo Strategicheskix Issledovaniy: operezhayushhaya podgotovka kadrov stanet mexanizmom perexoda k novoj promy`shlennosti [Agency for Strategic Studies: advanced training will be the

- mechanism for the transition to a new industry]. URL : <https://tass.ru/ural-news/3751204> (in Russian).
- [4] Zabolot'ko A.A. Innovacionnoe razvitie e`konomiki: ponyatie, problemy` i puti resheniya [Innovative development of the economy: the concept, problems and solutions]. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/v/innovatsionnoe-razvitie-ekonomiki-ponyatie-problemy-i-puti-resheniya> (in Russian).
 - [5] Vishtak N.M., Razumova T.A., Oskolkov A.P. Sistema podgotovki kadrov v atomnoj e`nergetike [System of personnel training in nuclear power] // Molodoj ucheny`j [Young scientist]. 2015. №22.5. P. 24-26. URL : <https://moluch.ru/archive/102/23622/> (in Russian).
 - [6] Godovoj otchet AO «Koncern Rose`nergoatom» za 2016 [Annual report of Rosenergoatom Concern JSC for 2016]. Moscow. 2017. URL : <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/673/6736f56972480fdbf340ee640b0882c4.pdf> (in Russian).
 - [7] Kamchatova E.Yu. Innovacionny`j potencial atomnoj e`nergetiki [Innovative potential of nuclear energy]. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/v/innovatsionnyy-potentsial-atomnoy-energetiki> (in Russian).
 - [8] Kolontaevskaya I.F. Kolontaevskaya, I.F. Proforientacionnaya rabota so shkol`nikami dlya postupleniya na inzhenerno-texnicheskie napravleniya podgotovki professional`nogo obrazovaniya [Vocational guidance work with schoolchildren for admission to the engineering and technical areas of vocational education] // Nauchno-metodicheskij e`lektronny`j zhurnal «Koncept» [Scientific-methodical electronic journal «Concept»]. 2014. №11 (November). P. 111-115. URL : <http://e-koncept.ru/2014/14319.htm> (in Russian).
 - [9] Pasport programmy` innovacionnogo razvitiya i texnologicheskoy modernizacii Goskorporacii «Rosatom» na period do 2030 goda (v grazhdanskoj chasti) [Passport of the innovation development and technological modernization program of ROSATOM for the period until 2030 (in the civilian part)]. State Atomic Energy Corporation «Rosatom». Moscow. 2016. URL : <https://www.rosatom.ru/upload/iblock/5e1/5e130b6e7fba0fb511f400defad83aca> (in Russian).
 - [10] Proekt «Shkola Rosatoma» [The project «School of Rosatom»]. URL : <https://rosatom.ru/career/obrazovanie/proekt-shkola-rosatoma/> (дата обращения: 04.04.2019).
 - [11] Marengo A.K. Realizaciya neprery`vnogo professional`nogo obrazovaniya v formirovanii kul`tury` bezopasnosti [Realization of continuous professional education in the formation of a safety culture] Bulletin of the RIAT. № 2. 2016. URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/realizatsiya-nepreryvnogo-professionalnogo-obrazovaniya-v-formirovanii-kultury-bezopasnosti> (in Russian).
 - [12] Moshkin V.N. Vospitanie kul`tury` bezopasnosti shkol`nikov : dis. d-ra ped. nauk : 13.00.01 [Raising a safety culture of schoolchildren: dis. dr ped Sciences]. Barnaul. 2004. 369 p. URL: <http://www.dslib.net/obw-pedagogika/vospitanie-kultury-bezopasnosti-shkolnikov.html>(in Russian).
 - [13] Cejko V.A. Kul`tura bezopasnosti zhiznedeyatel`nosti starsheklassnikov: sushhnost`, process formirovaniya i rezul`taty` [Life Safety Culture of High School Students: Essence, Formation Process and Results]. URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/kultura-bezopasnosti-zhiznedeyatelnosti-starsheklassnikov-suschnost-protsess-formirovaniya-i-rezultatyz> (in Russian).
 - [14] Goricheva V.D., Muzy`ka V.P., Sinicyn I.S. Teknologiya formirovaniya gotovnosti uchashhixsya k vy`boru professii v sfere bezopasnosti zhiznedeyatel`nosti [Technology of formation of students' readiness to choose a profession in the field of life safety]. Yaroslavl Pedagogical Journal. 2017. № 3. P. 39-44. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/tehnologiya-formirovaniya-gotovnosti-uchashhixsya-k-vyboru-professii-v-sfere-bezopasnosti-zhiznedeyatelnosti> (in Russian).
 - [15] 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). P. 118-122. (in Russian).
 - [16] Pasport nacional`nogo proekta «Obrazovanie» [Passport of the national project «Education»]. URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_319308/ (in Russian).
 - [17] Rudenko V.A., Golovko M.V., Ermolaeva N.V., Lobkovskaya N.I. Rannyya professional`naya orientaciya v sfere atomnoj e`nergetiki kak faktor strategicheskogo razvitiya atomnoj otrasli [Early professional orientation in the field of nuclear energy as a factor in the strategic development of the nuclear industry]. Global`naya yadernaya bezopasnost` [Global Nuclear Safety]. 2018. №4 (298). P. 97-108 (in Russian).
 - [18] O merax po sozdaniyu detskogo texnoparka «Kvantorium» v Rostovskoj oblasti [On measures to create a children's technopark «Kvantorium» in the Rostov region] (rasporyazhenie Pravitel`stva Rostovskoj oblasti № 482 ot 24.08.2017 [Executive Order of the Government of the Rostov Region No. 482 of August 24, 2017]) (in Russian).

The Formation of the Safety Culture of School Students in the Organization System of Leading Personnel Training for Atomic Energy

¹V.A. Rudenko, ²N.F. Privalova

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

¹ORCID iD: 0000-0002-6698-5469

WoS Researcher ID: B-7730-2016

e-mail: VARudenko@mephi.ru

¹ORCID iD: 0000-0002-6464-188

e-mail: NFPrivalova@mephi.ru

Abstract – The article reveals the relevance of developing a safety culture of schoolchildren in the system of organizing advanced training of engineering personnel for nuclear energy at the stage of innovative development of the industry; considers the possibility of professional orientation to the specialty areas of training, specialized for nuclear energy in the field of developing a safety culture of schoolchildren.

Keywords: safety culture, innovative development, engineering, advanced training, professional orientation.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ НОМЕРА

Абу Сондос М.А.	103
Берела А.И.	68
Григорьев Н.Г.	39
Демин В.М.	103
Доронин Ю.В.	31
Драка О.Е.	39
Жабунина О.Ю.	7
Зиновьев Г.С.	110
Игнаткин В.А.	76
Коломиец М.А.	76
Королев А.Д.	86
Королева И.Ю.	86
Кривин В.В.	39
Кубарев В.Ф.	31
Лапкис А.А.	76
Лушина Ю.Ю.	7
Муха Ю.П.	86
Наumenко Г.А.	93
Паринов М.А.	15
Паршукова Н.Ю.	7
Пимшин Ю.И.	93
Привалова Н.Ф.	124
Псарёв Ю.А.	93
Ращепкина С.А.	23
Руденко В.А.	124
Рыбачук А.М.	31
Саункин В.Т.	39
Смирнов А.Д.	103
Смирнов А.М.	47
Томилин С.А.	68
Федотов А.Г.	68
Хижов М. Ю.	59
Цветков Э.И.	86
Чембура В.С.	110
Шишов В.В.	47

AUTHOR INDEX OF VOL. 2, 2019

Abu Sondos M.A.	103
Berela A.I.	68
Chembura V.S.	110
Cubarew V.F.	31
Cvetkov E.I.	86
Demin V.M.	103
Doronin Yu.V.	31
Draka O.E.	39
Fedotov A.G	68
Grigoriev N.G.	39
Ignatkin V.A.	76
Khizhov M.YU.	59
Kolomietz M.A.	76
Korolev A.D.	86
Koroleva I.Y.	86
Krivin V.V.	39
Lapkis A.A.	76
Lushina Yu.Yu.	7
Mucha Yu.P.,	86
Naumenko G.A.	93
Parinov M.A.	15
Parshukova N.Yu.	7
Pimshin Y.I.	93
Privalova N.F.	124
Psarev Yu.A.	93
Rashchepkina S.A.	23
Rudenko V.A	124
Rybachuk A.M.	31
Saunkin V.T.	39
Shishov V.V.	47
Smirnov A. D.	103
Smirnov A.M.	47
Tomilin S.A.	68
Zhabunina O.Yu.	7
Zinoviev G.S.	110

NOTES FOR AUTHORS

(Dear authors, the editors of the journal draw your attention to some changes in the rules of the article preparation)

The full text of article intended for publication should be signed by authors, it has to be followed by application from the institution where the work is made, resolution on publication possibility. One file consists of one paper which has the following:

- UDC index;
- the title, the structured abstract (200-250 words) and keywords in Russian and English (not less than 10 speech units);
- the list of references in Russian and English;
- information about the authors in Russian and English (a surname, a name, a middle name, a work place, a position, an academic degree, a rank, postal address, and E-mail address, contact phone; specify who to be corresponded with;
- a file with information about place of employment in Russian and English, including the postal address and index (specify the place of employment of each author);
- ORCID и Researcher ID index of each author (<http://orcid.org> и <http://www.researcherid.com>).

The article should be structured: introduction (review of problems, objective of work); theory of the issue; a detailed presentation of the methods of conducting experiments, a description of materials and methods of analysis, statistical processing is desirable; the discussion of the results; conclusion. It is enough to describe the objective of the work and the results obtained for articles of a production nature.

The article should contain only the most necessary formulas, it is desirable to abandon the intermediate calculations. The equation editor of Equation 3.0 is recommended to record the formulas. All formulas are aligned to the center of the page, numbered in parentheses on the right and referred to in the text of the article. Inclusion of tables in the article should be appropriate. Tables should be numbered and headings in Russian and English (10 pf). It is desirable that the tables do not exceed one page of text. Figures should be clear when printing in black and white, numbered, figure captions in Russian and English (10 pf), have links in the text and be accompanied by justifications and conclusions. The units of measurement should be given in accordance with the International System (SI).

An article should be processed in the Microsoft Office 97-2003 Word 7.0 format, 12 point font Times New Roman; print - 1 interval. Please do not use signs of forced transfer and additional gaps. Page parameters: all sides are 2,5 cm. The volume of article has to be no more than 15 pages of the typewritten text, including tables, drawings (no more than 10) and the list of references (12-20 sources). If the text of the article is less than 2500 type characters, it may not be considered. It is necessary to check the articles through the Antiplagiat program, allowable borrowing and self-citation – no more than 20%.

In order to improve the quality and objectivity of publications, the authors are intended to reflect the advanced scientific experience of foreign countries, Russia and the CIS on the subject matter in the articles. The bibliography should be in accordance with State Standard Specification (GOST) 7.1-2003 “Bibliographic Record and Bibliographic Description. General Requirements and Drafting rules” (and its later version of 2008). References should include at least 12 sources (no more than 3 references to your own articles). There should be obligatory at least 5 sources later than 2016, and at least 4 references to foreign studies of recent years (from foreign countries, outside the former USSR). References are given at the end of article in order they mentioned. References are highlighted with square brackets. References to foreign sources are given in the original language and are accompanied, in case of translation into Russian, with indication of the translation. Textbooks, reference books, guidelines and recommendations are not included in the list of references. References are provided separately (see the guidelines in “The List of References Standard in English”). The bibliography in English should be issued according to **Scopus** standard specification. Indicate article **DOI** if it in the presence.

To accept an article in the journal you should provide the following materials:

- an article file in Word format;
- the same file in pdf format signed by the author;
- separate files of all pictures in the bmp, jpeg or gif formats;
- application from the institution where the work is made;
- expert resolution on publication possibility.

Personal copy can be obtained in the editorial office of the journal.

THE LIST OF REFERENCES STANDARD IN ENGLISH

For journals:

[1] Berela A.I., Bylkin B.K., Tomilin S.A., Fedotov A.G. Analiz i predstavlenie sredy deystviya v sisteme proektirovaniya tehnologii demontazha oborudovaniya pri vyvode iz ekspluatatsii bloka AES [The analysis and representation of the action environment in system of technology design of equipment dismantle during NPP unit taking out of operation] [Global nuclear safety]. 2014. № 1(10). P. 25-31 (in Russian).

[2] Lobkovskaya N.I., Evdoshkina Yu.A. Professional'noe celepolaganie kak sostavlyayushhaya kul'tury` bezopasnosti budushhego specialista-atomshhika [Professional Goal-Setting as a Component of the Safety Culture of a Future Nuclear Specialist]. Sovremennoe obrazovanie [Modern Education]. 2017. № 1. P. 32-38. URL: http://e-notabene.ru/pp/article_22498.html (in Russian).

For books:

[3] Mogilev V.A., Novikov S.A. Faykov Yu.I. Tekhnika vzryvnogo eksperimenta dlya issledovaniya mekhanicheskoy stoykosti konstruksiy. [Explosive experiment techniques for research of mechanical firmness of designs]. Sarov. FGUP "RFYaTs-VNIIEF" [Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics]. 2007. 215 p. (in Russian).

For web-resources:

[4] Strategia razvitiya transportnogo kompleksa Rostovskoy oblasti do 2030 goda [Development strategy of a transport complex of the Rostov region till 2030]. Officialnij sait Ministerstva transporta Rostovskoy oblasti [Official site of the Transport Ministry of Rostov region]. 2015. URL: <http://mindortrans.donland.ru/Default.aspx?pageid=107384> (in Russian).

For foreign references:

[5] Gulyaev M., Bogorovskaia S., Shapkina T. The Atmospheric air condition in Rostov Oblast and its effect on the population health // Scientific enquiry in the contemporary world: theoretical basics and innovative approach. CA. USA. B&M Publishing. 2014. P. 56-60.

For materials of conferences:

[6] Gerasimov S.I., Kuzmin V.A. Issledovaniye osobennostey initsirovaniya svetochuvstvitelny vzryvchatykh sostavov nekogerentnym izlucheniym [Research of features of initiation are photosensitive explosive structures incoherent radiation] [Works of the International conference "16 Haritonov's scientific readings"]. Sarov. FGUP "RFYaTs-VNIIEF" [Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics]. 2014. P. 90-93 (in Russian).

For materials of conferences (foreign references):

[7] Ishikawa M. et al. Reactor decommissioning in Japan: Philosophy and first programme. «N power performance and safety. Conference proceedings. Vienna, 28 September – 2 october 1987. V. 5. Nuclear Fuel Cycle». IAEA. Vienna. 1988. P. 121-124.

Editorial office address (for sending printed correspondence):

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

Editorial office of "Global Nuclear Safety" journal

E-mail: oni-viti@mephi.ru

Tel: +79281883628

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

(уважаемые авторы, редакция журнала обращает ваше внимание на некоторые изменения правил оформления статей)

Полный текст статьи, предназначенной для опубликования, должен быть подписан авторами и сопровождаться представлением от учреждения, в котором выполнена работа, и экспертным заключением о возможности опубликования. В одном файле помещается одна статья, частью которой является:

- индекс УДК;
- название, структурированная аннотация (200-250 слов) и ключевые слова (не менее 10-и речевых единиц) на русском и английском языках;
- список литературы на русском и английском языках;
- сведения об авторах на русском и английском языках: ФИО, место работы, должность, ученая степень, звание, домашний, служебный и электронный адреса, телефон; указать, с кем вести переписку;
- индексы ORCID и Researcher ID для каждого автора (<http://orcid.org> и <http://www.researcherid.com>)

Статья должна быть структурирована: введение (обзор проблем, цель работы); теория вопроса; подробное изложение методики проведения опытов, описание материалов и методов анализа, желательна статистическая обработка; обсуждение результатов; заключение. Для статей производственного характера достаточно описать цель работы» и полученные результаты.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться. Для записи формул рекомендуется применять редактор Equation 3.0. Все формулы выравниваются по центру страницы, нумеруются в круглых скобках по правому краю и упоминаются в тексте статьи. Включение таблиц в статью должно быть целесообразным. Таблицы нумеруются и имеют заголовки на русском и английском языках (10 пт). Желательно, чтобы таблицы не превышали одной страницы. Рисунки должны быть понятными при черно-белой печати, с нумерацией, подписями на русском и английском языках (10 пт), иметь ссылки в тексте и сопровождаться обоснованиями и выводами. Единицы измерения следует давать в соответствии с Международной системой (СИ).

Статья оформляется в Microsoft Office 97-2003 Word 7.0 через 1 интервал, шрифтом Times New Roman, размером 12 пт, без знаков принудительного переноса и дополнительных пробелов. Поля со всех сторон – 2,5 см. Объем статьи – не более 15 страниц машинописного текста, включая таблицы и рисунки (не более 10-и), список литературы (12-20 источников). Если в тексте статьи менее 2500 знаков, статья может не рассматриваться. Необходима проверка статей через программу антиплагиата, допустимые заимствования и самоцитирование – не более 20%.

С целью повышения качества и объективности публикаций авторы призваны отражать в статьях передовой научный опыт стран дальнего зарубежья, России и СНГ по рассматриваемой проблематике. Библиография оформляется согласно ГОСТу 7.1-2003 «Библиографическая запись и библиографическое описание. Общие требования и правила составления» (и его более поздней версии 2008 года). Список литературы включает не менее 12-и источников (из них не более 3-х ссылок на собственные работы), с обязательным включением как минимум 5-и источников позднее 2016 г., и не менее 4 ссылок на зарубежные (из стран дальнего зарубежья, за пределами бывшего СССР) исследования последних лет. Список литературы приводится в конце статьи в порядке упоминания в тексте в квадратных скобках номера источника. Ссылки на иностранные источники даются на языке оригинала и сопровождаются, в случае перевода на русский язык, указанием на перевод. Учебники, учебные пособия, 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.

Авторский экземпляр можно получить в редакции журнала.

ПРИМЕРЫ ОФОРМЛЕНИЯ ЛИТЕРАТУРЫ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

Для книг с одним автором:

Кесслер, Г. Ядерная энергетика [Текст] / Г. Кесслер ; пер. с англ. : Ю.И. Митяев. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 264 с.

Для книг с двумя и более авторами:

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

Для журналов с одним автором:

Петров, Н.Н. Принципы построения образовательных программ и личностное развитие учащихся [Текст] / Н.Н. Петров // Вопросы психологии. – 1999. – № 3. – С. 39.

Для журналов с двумя и более авторами:

Евдошкина, Ю.А. Практико-ориентированная технология формирования культуры безопасности выпускников, ориентированных на работу в атомной отрасли [Текст] / Ю.А. Евдошкина, В.А. Руденко // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 4 (25). – С. 122-129.

Для диссертаций:

Дзякович, Е.В. Стилистический аспект современной пунктуации : автореф. дис. канд. филол. наук [Текст] / Е.В. Дзякович. – Москва, 1984. – 30 с.

Для депонированных работ:

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

Описание архивных материалов:

Гуцин, Б.П. Журнальный ключ [Текст] // НРЛИ. Ф. 209. Оп. 1. Д. 460. Л. 9.

Материалы конференций:

Шишков, Ю. Россия и мировой рынок: структурный аспект [Текст] / Ю. Шишков // Социальные приоритеты и механизмы преобразований в России: материалы междунар. конф. Москва, 12-13 мая 1998 г. – Москва : Магма, 1993. – С. 19-25.

Для патентов:

Пат. 2187888 Российская Федерация, МПК7 Н 04 В 1/38, Н 04 J 13/00. Приемопередающее устройство [Текст] / Чугаева В. И. ; заявитель и патентообладатель Воронеж. науч.-исслед. ин-т связи. – № 2000131736/09 ; заявл. 18.12.00 ; опубл. 20.08.02, Бюл. № 23 (II ч.). – 3 с.

Для авторских свидетельств:

А. с. 1007970 СССР, МКИЗ В 25 J 15/00. Устройство для захвата неориентированных деталей типа валов / В. С. Ваулин, В. Г. Кемайкин (СССР). – № 3360585/25-08 ; заявл. 23.11.81 ; опубл. 30.03.83, Бюл. № 12. – 2 с.

Для электронных ресурсов:

Дирина, А.И. Право военнослужащих РФ на свободу ассоциаций [Электронный ресурс] / А.И. Дирина // Военное право: сетевой журн. – 2010. – №2. – URL : <http://voennoepravo.ru/node/2149> (дата обращения: 01.08.2018).

Адрес редакции журнала (для отправки печатной корреспонденции):
347360, Россия, Ростовская область, г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94. Редакция журнала «Глобальная ядерная безопасность».
E-mail: oni-viti@mephi.ru
Тел.: +79281883628

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

2019, 2(31)

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

Сдано в набор 14.06.2019 г.

Компьютерная верстка Казак Ю.Ю.

Подписано к печати 24.06.2019 г.

Бумага «SvetoCory» 80 г/м². Объем 8,74 .печ.л.

Гарнитура «TimesNewRoman»,

Тираж 300 экз.

Отпечатано в типографии ВИТИ (ф) НИЯУ МИФИ