

NATIONAL RESEARCH NUCLEAR UNIVERSITY MEPhI

GLOBAL NUCLEAR SAFETY

2022, 3(44)

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)

V.P. Povarov, Doctor of Technical sciences (Russia)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

M.V. Golovko, Doctor of Economic sciences (Russia)

N.M. Fomenko, Doctor of Economic sciences (Russia)

A.N. Shilin, Doctor of Technical sciences, 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

2022, 3(44)

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 (№894)
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)
В.П. Поваров, д-р техн. наук, проф. (Россия)
М.К. Скаков, д-р физ.-мат. наук, проф. (Казахстан)
В.Е. Шукинунов, д-р техн. наук, проф. (Россия)
А.В. Чернов, д-р техн. наук, проф. (Россия)
А.П. Елохин, д-р техн. наук, проф. (Россия)
Ю.И. Пимшин, д-р техн. наук, проф. (Россия)
В.В. Кривин, д-р техн. наук, проф. (Россия)
В.И. Ратушный, д-р физ.-мат. наук, проф. (Россия)
А.А. Сальников, к-т техн. наук (Россия)
С.Э. Гоок, к-т техн. наук (Германия)
М.В. Головкин, д-р экон. наук, проф. (Россия)
Н.М. Фоменко, д-р экон. наук, проф. (Россия)
А.Н. Шилин, д-р техн. наук, проф. (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

2022, 3(44)

NUCLEAR, RADIATION AND ENVIRONMENTAL SAFETY

Analysis of Methods and Technologies for Composition Assessing of Corium Formed as a Result of the Fukushima Daiichi NPP Accident

S.N. Ryzhov, E.V. Bogdanova, A.A. Ryzhkov, P.A. Pugachev, G.V. Tikhomirov, M.Yu. Ternovyykh, T.B. Aleeva 5

DESIGN, MANUFACTURING AND COMMISSIONING OF NUCLEAR INDUSTRY EQUIPMENT

Analysis of the Experience of the Operating Organization's Participation in the Implementation of Projects for the Construction of Foreign Nuclear Power Plants

A.A. Salnikova, D.V. Gudemenko 22

Prospects of Creating a Full-Scale Diagnostic Simulator for NPP Electric Drive Equipment

A.A. Lapkis, M.V. Kalashnikov, I.A. Mikshin 30

OPERATION OF NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

Clustering of Acoustic Events in Main Circulation Circuit of WWER 1000/1200 Reactor Facility Caused by Normal Technological Operations

G.V. Arkadov, I.V. Trykova, K.I. Kotsoev 43

Validation of Methodology of Monitoring Drives Technical Condition of Control and Protection System of Reactor Installation Power Units Using Modeling

E.A. Abidova, O.Yu. Pugacheva 56

Comparative Analysis of Methods of Axial Profiling of WWER-1200 Fuel Assembly on Model Z49A2 Example

E.A. Gerdt, R.A. Vnukov 65

SAFETY CULTURE AND SOCIAL AND ECONOMIC ASPECTS OF NUCLEAR INFRASTRUCTURE AREA DEVELOPMENT

Innovative Model of Vocational Cooperation of Stakeholders in the Nuclear Industry on the Basis of Volgodonsk Engineering Technical Institute the Branch of National Research Nuclear University «MEPhI»

V.A. Rudenko, S.A. Tomilin, A.V. Zheleznyakova, N.I. Lobkovskaya 73

Educational Institutions of Higher Education as Development Driver of Nuclear Power Plant Areas

N.F. Privalova, V.A. Rudenko, I.A. Bublikova 86

Author Index of vol. 3, 2022 99

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 3(44), 2022

ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Анализ методов и технологий оценки состава кориума, образовавшегося в результате аварии на АЭС Фукусима Дайити

Рыжов С.Н., Богданова Е.В., Рыжков А.А., Пугачев П.А., Тихомиров Г.В., Терновых М.Ю., Алеева Т.Б......5

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Подходы к оказанию услуг на этапе сооружения атомных станций за рубежом

Сальникова А.А., Гудеменко Д.В......22

Перспективы создания натурного тренажера диагностики электроприводного оборудования АЭС

Лапкин А.А., Калашников М.В., Мишин И.А......30

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Кластеризация акустических событий в главном циркуляционном контуре реакторной установки с ВВЭР-1000/1200, обусловленных штатными технологическими операциями

Аркадов Г.В., Трыкова И.В., Коцков К.И......43

Валидация методики контроля технического состояния приводов системы управления и защиты энергоблоков реакторной установки с использованием моделирования

Абидова Е.А., Пугачева О.Ю......56

Сравнительный анализ методов аксиального профилирования ТВС реактора ВВЭР-1200 на примере модели Z49A2

Гердт Э.А., Внуков Р.А......65

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

Инновационная модель профориентационной кооперации стейкхолдеров атомной отрасли на базе Волгодонского инженерно-технического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

Руденко В.А., Томилин С.А., Железнякова А.В., Лобковская Н.И......73

Образовательные организации высшего образования как драйвер развития территорий расположения АЭС

Привалова Н.Ф., Руденко В.А., Бубликова И.А......86

Авторский указатель номера 3(44), 2022.....99

**ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**
NUCLEAR, RADIATION AND
ENVIRONMENTAL SAFETY

УДК 621.039.586 (520)
doi: 10.26583/gns-2022-03-01

**АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ОЦЕНКИ СОСТАВА
КОРИУМА, ОБРАЗОВАВШЕГОСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИИ
НА АЭС ФУКУСИМА ДАЙТИ**

© 2022 Рыжов Сергей Николаевич¹, Богданова Екатерина Владимировна²,
Рыжков Александр Александрович³, Пугачев Павел Александрович⁴,
Тихомиров Георгий Валентинович⁵, Терновых Михаил Юрьевич⁶,
Алеева Татьяна Борисовна⁷

^{1,2,3,4,5,6,7}Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

¹SNRyzhov@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1801-7615>

²EVBogdanova@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8184-2124>

³AARyzhkov@mephi.ru

⁴PAPugachev@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8175-3957>

⁵GVTikhomirov@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5332-7272>

⁶MYTernovykh@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9830-5501>

⁷TBAleeva@mephi.ru

Аннотация. В данной работе проводится анализ методов и технологий оценки способа образования, состава, характеристик и особенностей кориума, который является смесью ядерных и конструкционных материалов активной зоны ядерного реактора, образовавшейся в результате аварии, сопровождаемой частичным или полным расплавлением активной зоны. Исследование проводится на основе данных по изучению кориума, образовавшегося в результате аварии на атомной электростанции Фукусима Дайти, находящихся в открытом доступе и являющимися результатом работы множества научных организаций по всему миру. Исследования кориума представляют собой один из главных вопросов в рамках повышения ядерной безопасности в дальнейшем и является одной из задач проведения успешной процедуры устранения последствий аварии на АЭС Фукусима Дайти. Без подробного анализа нейтронно-физических, материаловедческих, гравиметрических и иных характеристик кориума, а также создания комплекса данных по кориуму объединяющего в себе эти характеристики, невозможно в дальнейшем создать полноценную модель кориума и организовать эффективный и безопасный процесс удаления ядерных материалов из поврежденных блоков атомной электростанции Фукусима Дайти. Целью работы является объединение существующих результатов исследований в комплекс данных, который в дальнейшем может быть использован для моделирования кориума с использованием нейтронно-физических кодов. Создаваемый комплекс, включает в себя такие данные, как размер, плотность и морфология образцов кориума и их приблизительный нуклидный состав. Создаваемый комплекс данных позволит не только выполнять задачи, связанные с повышением уровня безопасности при реализации процедуры устранения последствий аварии на АЭС Фукусима Дайти путем моделирования, но и послужить основой для создания международного бенчмарка моделирования смеси, содержащей ядерные материалы (ЯМ).

Ключевые слова: Фукусима, кориум, авария, нейтронно-физическое моделирование, обзор, гамма-спектрометрия, Три-Майл-Айленд, деконтаминация, расплавление активной зоны, нуклидный состав, ядерное топливо.

Для цитирования: Рыжов С.Н., Богданова Е.В., Рыжков А.А., Пугачев П.А., Тихомиров Г.В., Терновых М.Ю., Алеева Т.Б. Анализ методов и технологий оценки состава кориума, образовавшегося в результате аварии на АЭС Фукусима Дайти // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 3(44). – С. 5-21. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-03-01>

Поступила в редакцию 15.06.2022

После доработки 17.08.2022

Принята к печати 31.08.2022

Введение

В результате аварии на атомной электростанции Фукусима Дайити, произошедшей 11 марта 2011 года, на энергоблоках станции произошло нарушение третьего барьера безопасности, т.е. нарушение целостности корпуса реактора. Часть радиоактивных материалов из активных зон реакторов энергоблоков 1-3 вышла за пределы корпуса реактора. Это привело к возникновению дополнительной опасности и трудностям в процедуре локализации, иммобилизации и транспортировки ядерных материалов с территории АЭС Фукусима Дайити в ходе ликвидации последствий аварии. В результате аварии, сопровождавшейся расплавлением активной зоны и корпуса реактора, был образован кориум – лаваобразный сплав содержимого ядерного реактора, состоящий из смеси ядерного топлива с бетоном, металлических элементов конструкций и прочего [1].

Одной из сложнейших задач процедуры устранения последствий данной аварии является оценка структуры и свойств кориума – сплава с крайне высоким уровнем излучения. До настоящего времени высокий уровень радиационной обстановки, ограниченность маневренности и труднодоступность пространства не позволяют получить полную картину о реальной ситуации внутри и снаружи поврежденной активной зоны, в том числе определить состав и основные характеристики кориума даже с использованием современной роботизированной техники. Стоит особо отметить, что на данный момент неизвестны ни нуклидный состав кориума, ни его распределение. Задача осложняется тем, что необходимо учитывать возможные изменения в кориуме при его перемещении или любом другом взаимодействии с ним.

В работе представлен полноценный комплекс данных по кориуму, включающий в себя нуклидный состав, геометрические и плотностные характеристики элементов кориума, строение (уровень гомогенности элементов) и структура, подготовленный на основе результатов проведенных исследований, находящихся в открытом доступе. Учитывая, что некоторые существующие исследования противоречат друг другу, сформирована система различных вариантов набора характеристик кориума, которые значительно отличаются в ряде параметров. Данная система в дальнейшем может быть использована для обоснования безопасности при выводе из эксплуатации АЭС Фукусима Дайити. В исследовании используется опыт анализа предыдущей крупной аварии с расплавлением активной зоны, которая имела место на втором энергоблоке электростанции Три-Майл-Айленд в США в 1979 году.

Оценка применимости методов анализа поврежденной активной зоны реактора АЭС Три-Майл-Айленд

28 марта 1979 года в США на втором энергоблоке АЭС Три-Майл-Айленд (ТМІ-2) произошла авария, в результате которой наблюдалось расплавление около 50 % активной зоны реактора, после чего энергоблок так и не был восстановлен. Для определения возможности использования данных по структуре и составу кориума ТМІ-2 для анализа кориума на АЭС Фукусима Дайити был изучен ряд официальных отчетов о ходе протекания аварии и ее последствиях [2-9]. Можно утверждать, что условия формирования кориума весьма схожи [2], и полученные данные могут быть использованы для разработки системы различных вариантов набора характеристик кориума.

При анализе аварий на ТМІ-2 и на АЭС Фукусима Дайити можно сделать вывод, что в обоих случаях в результате аварии произошло расплавление материалов активной зоны, включая топливные, конструкционные и поглощающие материалы и продукты деления (ПД), что привело к образованию кориума, процент содержания делящихся материалов в котором зависел от месторасположения отдельных его элементов в поврежденной активной зоне [2]. Для обоих случаев, одной из главных задач процедуры устранения последствий аварии являлось определение состава кориума для

его эффективного извлечения из поврежденной активной зоны с дальнейшей утилизацией. При этом, как будет показано далее, в настоящее время большинство методов оценки состава и процентного соотношения ядерных материалов кориума основывается на опыте и наработках, которые были разработаны для решения задач анализа кориума на ТМІ-2. Рассмотрим более подробно особенности подходов к анализу кориума на ТМІ-2, а также результаты исследований, которые могут быть использованы для моделирования кориума.

В [3] приводятся оценки аварии на ТМІ-2, включая исследование взаимодействия топлива и конструкционных материалов, анализ состава элементов кориума, дозиметрия, оценка структура поврежденной активной зоны реактора и другое. На рисунке 1 показаны представления о структуре поврежденной активной зоны от чисто гипотетического (рис. 1 а) до оцененного с использованием специализированных кодов (таких как ATHLET, MELCORE, MAAP, MARCH и другие) (рис. 1 б). На рисунке 2 показаны представления, сформированные на основе анализа проб.

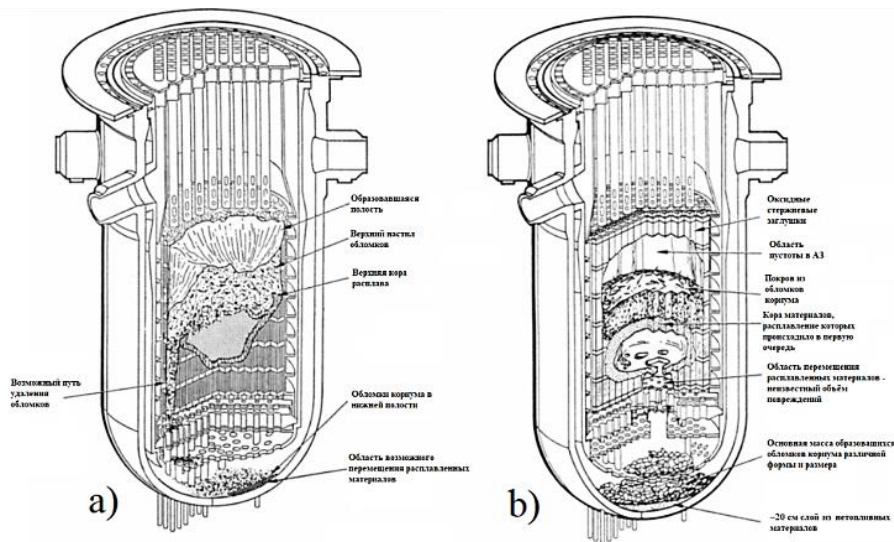


Рисунок 1 – а) Гипотетическое и б) оцененное с использованием специализированных программ представления о структуре и состоянии активной зоны реакторов на ТМІ-2 (1986-1987) [3] [a) Hypothetical and b) estimated by using specialized software representations of the TMI-2 reactor core structure and state (1986-1987)]

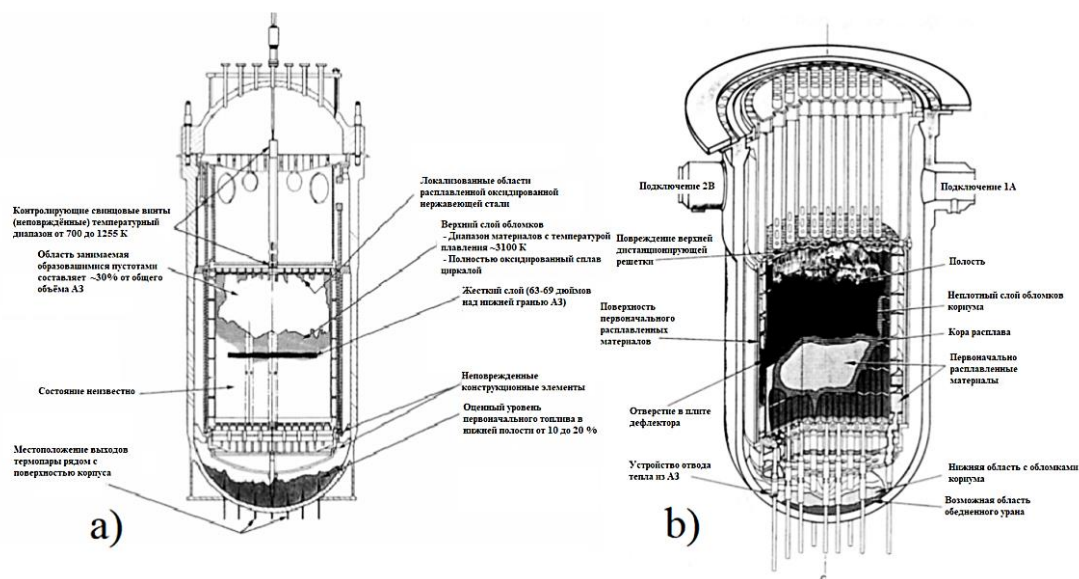


Рисунок 2 – Уточненная структура и состояние активной зоны и внутрикорпусного пространства поврежденного реактора на ТМІ-2 на момент а) начала процедуры извлечения топлива (1985-1986) и на момент б) её окончания (1987-1990) [3] [Refined core and internal space structure and state of the damaged TMI-2 reactor at the a) start of the fuel extraction procedure (1985-1986) and at the time b) its completion (1987-1990)]

На основе анализа изменения представлений о структуре поврежденной зоны, показанных на рисунках 1-2, можно сделать вывод, что применение специализированного инструментария и метода пробоотбора с дальнейшим анализом проб позволяет повысить детализацию структуры поврежденной активной зоны. А это, в свою очередь, позволяет корректно сформировать план извлечения кориума из активной зоны. С точки зрения решаемой задачи интерес представляет конечное распределение материалов активной зоны в результате аварии и распределение обломков кориума в объеме активной зоны поврежденного реактора. Ценными для данной работы являются данные по исследованию образцов кориума. При формировании системы вариантов модели кориума в дальнейшем использовались данные по исследованию взаимодействия материалов АЗ реактора при сверхвысоких температурах [4], данные по гравиметрическим исследованиям образцов кориума в зависимости от места пробоотбора в активной зоне [4], а также сборные данные нескольких исследований образцов кориума с точки зрения металлургии и материаловедения из разрушенной активной зоны ТМІ-2 [7].

Примером результатов исследования кориума, образовавшегося в результате аварии на ТМІ-2, которые могут быть использованы для подготовки комплекса данных, является набор измерений и классификация отдельных элементов кориума, собранных в нижней части корпуса реактора поврежденного энергоблока ТМІ-2, приведенные в работе [7]. В набор данных входят сведения о количественном содержании урана в частицах кориума, распределение отдельных частиц кориума по размеру, плотности и обогащению. В таблицах 1-3, представлены результаты анализа для 4 отдельных наборов проб, взятых в нижней части корпуса реактора, обозначенных как SSC-1-2, SSC-1-3, SSC-1-5 и SSC-1-7. Неопределенность результатов исследования составляет 2-5% для показателей массы и размера и 10-15% для показателя количества урана в составе образца.

Таблица 1 – Размер и плотность частиц кориума в нижней части корпуса реактора поврежденного энергоблока ТМІ-2 [7] [Size and density of corium particles in the reactor vessel lower part of the damaged power unit TMI-2]

Размер частиц	Распределение размера частиц, % (плотность частиц, г/см ³)			
	SSC-1-2	SSC-1-3	SSC-1-5	SSC-1-7
> 4 мм	6,5 (8,0)	36,6 (7,2)	37,2 (7,8)	26,6 (7,6)
2-4 мм	13,8 (7,8)	33,7 (7,3)	26,5 (8,2)	37,3 (7,8)
1-2 мм	11,6 (6,3)	18,9 (7,6)	16,7 (8,0)	23,6 (7,8)
710-1000 мкм*	5,9 (4,6)	4,6 (8,8)	4,8 (8,0)	4,6 (7,9)
300-710 мкм	16,1 (6,3)	4,9 (8,1)	8,5 (7,7)	5,2 (6,5)
150-300 мкм	14,5 (5,7)	0,91 (8,1)	3,2 (7,7)	1,4 (6,5)
90-150 мкм	11,2 (6,5)	0,17 (4,6)	1,3 (7,2)	0,52 (7,2)
38-90 мкм	13,4 (6,3)	0,07 (3,8)	1,1 (6,4)	0,48 (4,4)
< 38 мкм	7,0 (4,1)	- (-)	0,72 (4,0)	0,28 (3,8)
Средняя взвешенная плотность	6,3	7,4	7,9	7,7

*Неопределенность результатов оценки плотности частиц размером менее 710 мкм составляет 50% в связи с малым количеством измеряемого материала.

Таблица 2 – Содержание урана в составе образцов кориума и уровень обогащения урана в образцах кориума в нижней части корпуса реактора поврежденного энергоблока ТМІ-2 [7] [Uranium content in the corium samples composition and the level of uranium enrichment in corium samples in the lower reactor vessel part of the damaged TMI-2 power unit]

Размер частиц	Содержание урана в составе частиц, % (Уровень обогащения урана в составе частиц, %)			
	SSC-1-2	SSC-1-3	SSC-1-5	SSC-1-7
> 4 мм	68 (2,4)	62 (2,6)	73 (2,7)	69 (2,4)
2-4 мм	48 (2,6)	45 (2,8)	- (-)	64 (2,6)
1-2 мм	49 (-)	62 (2,7)	43 (2,7)	65 (2,8)
710-1000 мкм	47 (2,6)	58 (2,6)	50 (2,6)	56 (2,5)
300-710 мкм	51 (2,9)	53 (2,4)	51 (2,8)	58 (2,6)
150-300 мкм	- (-)	58 (2,6)	56 (2,6)	60 (2,4)
90-150 мкм	60 (2,6)	53 (2,4)	54 (2,6)	52 (2,8)
38-90 мкм	41 (2,3)	54 (2,8)	52 (2,5)	64 (2,4)
< 38 мкм	46 (-)*	- (-)	- (-)	55 (2,5)

*Оцененное обогащение для данных образцов превысило максимальное обогащение по активной зоне (2,98%)

Таблица 3 – Содержание элементов-эмиттеров гамма частиц в образцах кориума в нижней части корпуса реактора поврежденного энергоблока ТМІ-2 для набора образцов SSC-1-2 [7] [The gamma-ray emitter elements content in lower part corium samples of the damaged power unit TMI-2 reactor vessel for a set of samples SSC-1-2]

Размер частиц	Вес образца, грамм	Содержание элементов-эмиттеров гамма частиц в образцах кориума, мКи/грамм (измерения проводились 1 апреля 1987 года)					
		²⁷ Co-60		⁵⁵ Cs-134		⁵⁵ Cs-137	
		Значение	Ошибка	Значение	Ошибка	Значение	Ошибка
4 мм	0,4382	4,079E+00	1,114E-01	1,574E+01	2,880E-01	7,117E+02	4,484E+00
2 мм	0,2741	3,406E+00	8,208E-02	7,905E+00	1,431E-01	3,435E+02	1,958E+00
1 мм	0,2985	4,923E+00	1,078E-01	1,633E+01	2,205E-01	9,484E+02	5,311E+00
710 мкм	0,3296	5,008E+00	3,806E-01	1,526E+01	2,045E-01	7,602E+02	8,438E+00
300 мкм	0,2573	4,639E+00	7,608E-01	2,610E+01	5,063E-01	1,383E+03	8,983E+00
90 мкм	0,2031	3,799E+01	5,471E-01	3,710E+01	5,639E-01	1,884E+03	3,014E+00
38 мкм	0,3002	1,622E+01	5,780E-01	2,129E+01	3,832E-01	1,035E+03	7,763E+00

Результаты, представленные в таблицах 1-3, позволяют сформировать понимание о размере, составе и соотношении материалов в образцах кориума в нижней части корпуса реактора ТМІ-2. Эти данные можно использовать в качестве реперной точки для описания кориума, при учёте ряда факторов, отличающих данные параметры для кориума на АЭС Фукусима Дайити и ТМІ-2. Для полноценного анализа параметров кориума ТМІ-2 и формирования более точного описания, необходимо учитывать различие параметров кориума в зависимости от его местоположения в поврежденной активной зоне. Аналогично исследованию кориума в нижней части корпуса реактора, в работах [5-6] проводились исследования образцов кориума, взятых в иных точках поврежденной активной зоны.

Различие анализируемых параметров в зависимости от местоположения элементов кориума в активной зоне после аварии связано не только с разным уровнем температур в противоположных точках активной зоны, но и с особенностями протекания процесса формирования кориума на этапах расплавления, кристаллизации и растрескивания, что является выводами исследования [8]. Кроме того, результатом рассматриваемого исследования является также подробный анализ внутренней

структуры кориума, сформировавшегося в нижней части корпуса реактора, с учётом особенностей формирования состава исследуемых обломков. Данный анализ был проведен на основе расчётных и экспериментальных исследований.

Для проведения возможных расчётных исследований тепломассобмена в кориуме на различных этапах его формирования могут быть использованы данные, являющиеся результатом исследования [9] по оценке таких параметров элементов кориума, как удельная теплоемкость, коэффициент теплового расширения, тепловая диффузия, температура плавления и другие параметры.

Совокупность данных из ранее рассмотренных работ может быть полезна для формирования представления о структуре элементов кориума и создания комплекса параметров элементов кориума для их дальнейшего моделирования. Результаты вышеописанных работ не только не противоречат результатам исследования кориума, образовавшегося в результате аварии на АЭС Фукусима Дайити, но и косвенно подтверждают их, так как соответствуют условиям формирования кориума. Исходя из этого, можно сделать вывод о близких условиях формирования кориума в рассматриваемых авариях и подтвердить применимость методов анализа кориума, применявшихся для аварии на АЭС Три-Майл-Айленд в задачах анализа кориума на АЭС Фукусима Дайити [10-12]. В пользу этого также свидетельствуют данные, представленные в научной работе [12], результатом которой является заключение о возможности применения технологий гамма-спектрометрии, используемые на ТМІ-2 для анализа элементов кориума, сформировавшегося в результате аварии на АЭС Фукусима Дайити. Основанием для такой возможности являются схожие ход протекания аварии с точки зрения взаимодействия материалов между собой и ее последствия в виде расплавления активной зоны. В алгоритме проведения оценки содержания ядерных материалов в элементах кориума с использованием метода пассивной неразрушающей гамма-спектрометрии, представленном в виде схемы на рисунке 3, присутствуют четыре основных этапа [12]:

- измерение гамма-спектра элементов кориума;
- оценка активности высокоэнергетических гамма-излучающих малолетучих ПД с коррекцией ослабления излучения;
- оценка уровня выгорания с использованием гамма-спектрометрии и соотношения ПД к ядерному материалу, определяемого через расчёт состава топлива;
- определение количества ЯМ в элементах кориума с помощью данных, полученных на 2 и 3 этапах.



Рисунок 3 – Блок-схема последовательных операций технологии пассивной гамма-спектрометрии для количественного определения ядерных материалов в образце кориума [12] [Block diagram of passive gamma spectrometry technology sequential operations for the nuclear materials quantitative determination in a corium sample]

Схема, описанная выше, стала основой развития гамма-спектрометрических методов определения характеристик кориума. Данные методы совершенствовались с точки зрения, как применяемого оборудования, так и введением дополнительных процессов в зависимости от анализируемых объектов. На основе дальнейшего литературного обзора становится очевидно, что большая часть разработанных методов анализа кориума, образовавшегося в результате аварии на АЭС Фукусима Дайити, являются развитием метода гамма-спектрометрии, алгоритм которой представлен на рисунке 3. Таким образом, часть данных, собранных в результате анализа аварии на ТМІ-2, может быть использована для формирования системы вариантов набора характеристик кориума на АЭС Фукусима Дайити с целью его дальнейшего изучения.

Подготовка параметров системы различных вариантов модели кориума

Целью данной работы является разработка системы различных вариантов набора характеристик кориума на основе литературного обзора и анализа источников, частично содержащих в себе показания прямых измерений и наблюдений и, частично, результаты расчётов, проведенных передовыми научными организациями.

Принимая во внимание наличие расхождений в полученных данных, необходимо рассмотрение граничных вариантов оцененных характеристик кориума, которые будут наиболее сильно отличаться в ряде параметров. В противном случае использование результатов одного конкретного научного исследования снижает научную ценность данной работы и повышает вероятность формирования описания, значительно отличающегося от реального. Наиболее подходящим методом формирования крайних случаев является введение и использование коэффициентов учёта различий параметров. Рассматриваются следующие параметры:

- соотношение нуклидов в кориуме по типу групп первоначальных материалов активной зоны реактора. В число таких типов групп входят: топливные нуклиды и продукты деления, оксиды циркония, цирконий в металлической форме, нержавеющая сталь, оксиды нержавеющей стали, поглощающие материалы;
- состав кориума в зависимости от пространственного положения в момент аварии и его конечного местоположения;
- данные о структуре и морфологии образования кориума;
- данные о переходе отдельных нуклидов в состав кориума или в окружающую среду.

Таким образом, разработка системы различных вариантов набора характеристик кориума будет осуществлена в соответствии с блок-схемой, представленной на рисунке 4.

Следующим этапом обзора является анализ результатов исследований по рассматриваемым параметрам, необходимым для формирования комплекса данных кориума.

Составление набора характеристик и параметров кориума на основе результатов проведенных исследований

Важной частью данного обзора является сбор характеристик и параметров элементов кориума, образовавшегося в результате аварии на АЭС Фукусима Дайити. На основе анализа результатов исследований образцов кориума, находящихся в открытом доступе, проводится компиляция набора характеристик и параметров, который может быть использован для дальнейшего моделирования кориума с высоким уровнем достоверности и детализации. Сбор данных характеристик и параметров является одним из этапов алгоритма формирования системы различных вариантов параметров кориума, описанной и представленной на рисунке 4.

Часть необходимых данных была получена в результате анализа работ [10-11], где проводилось изучение процесса формирования кориума и его свойств. На основе записей мониторинга эксплуатации АЭС Фукусима Дайити [11] были собраны параметры топлива, удельная мощность реакторов, уровень выгорания, начальное количество делящихся материалов в топливе (для малообогащенного оксидного и МОХ топлива).

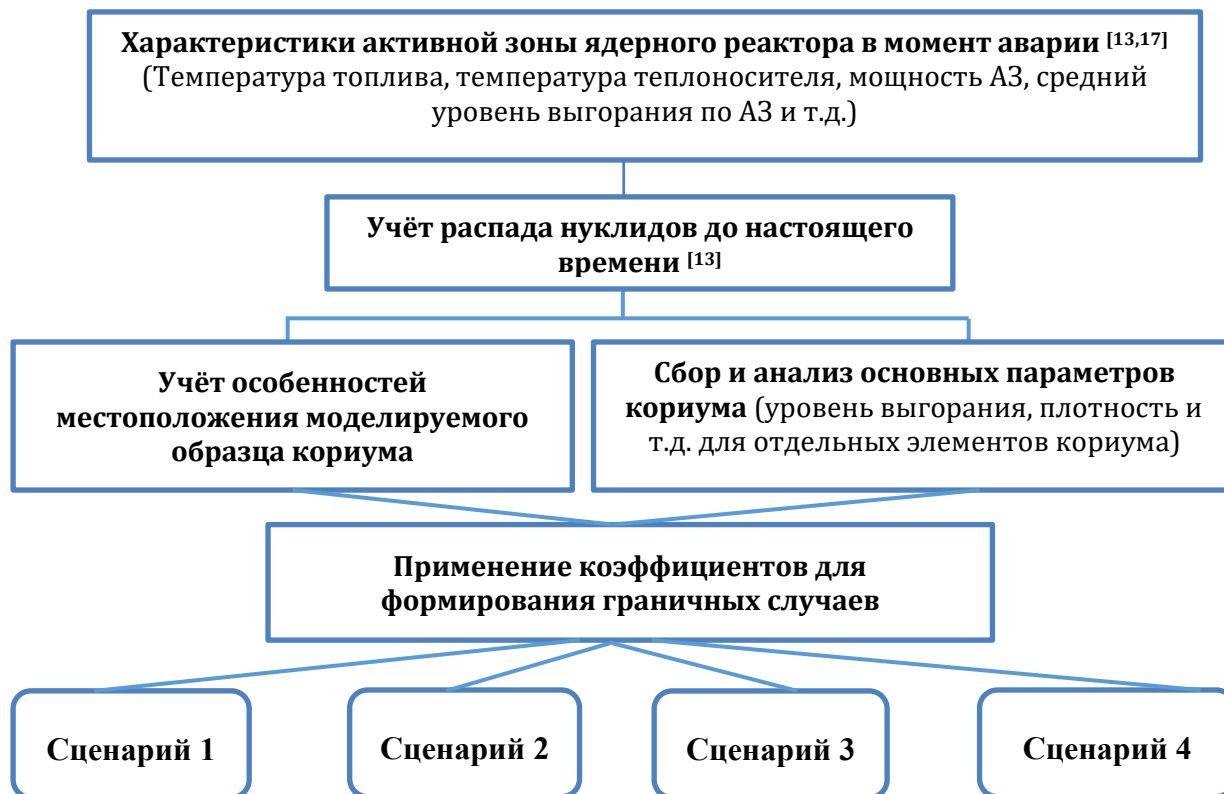


Рисунок 4 – Блок-схема формирования системы различных вариантов модели кориума
[Block diagram of the system of various variants of the corium model formation]

Параметры, относящиеся к эксплуатационным характеристикам АЭС Фукусима Дайити, были также получены из работ [14-15]. Кроме того, в работе [14] были представлены результаты расчёта нуклидного состава после облучения в процессе эксплуатации АЭС Фукусима Дайити с помощью кодов ORIGEN2 и SWAT. Количественные оценки массы нуклидов значительно отличаются в зависимости от типа топлива, которое различно для активных зон отдельных энергоблоков, и представленные значения могут быть использованы только в качестве грубой оценки. Тем не менее, описанные в работе параметры и характеристики кориума могут быть использованы для оценки содержания урана и плутония в его составе.

Одним из основных источников данных для формирования системы вариантов набора характеристик кориума являются результаты расчёта международного бенчмарка BSAF (Benchmark Study of the Accident at the «Fukushima Daiichi» NPP) [16], в основе которого лежат исследования аварии на АЭС Фукусима Дайити для 1, 2 и 3 энергоблоков, включая результаты расчетов по таким кодам, как MELCORE, TOLBIAC, ASTEC, THALES, MAAP, SAMPSON, HYSPLIT, SOCRAT. В работе [18] представлены совокупные результаты исследований, проведённых в рамках расчёта бенчмарка BSAF, в том числе нуклидный состав в различных областях поврежденной активной зоны реактора. На рисунке 5 представлены результаты моделирования элементов кориума, сформировавшихся и переместившихся в процессе аварии в полость контейнмента реактора.

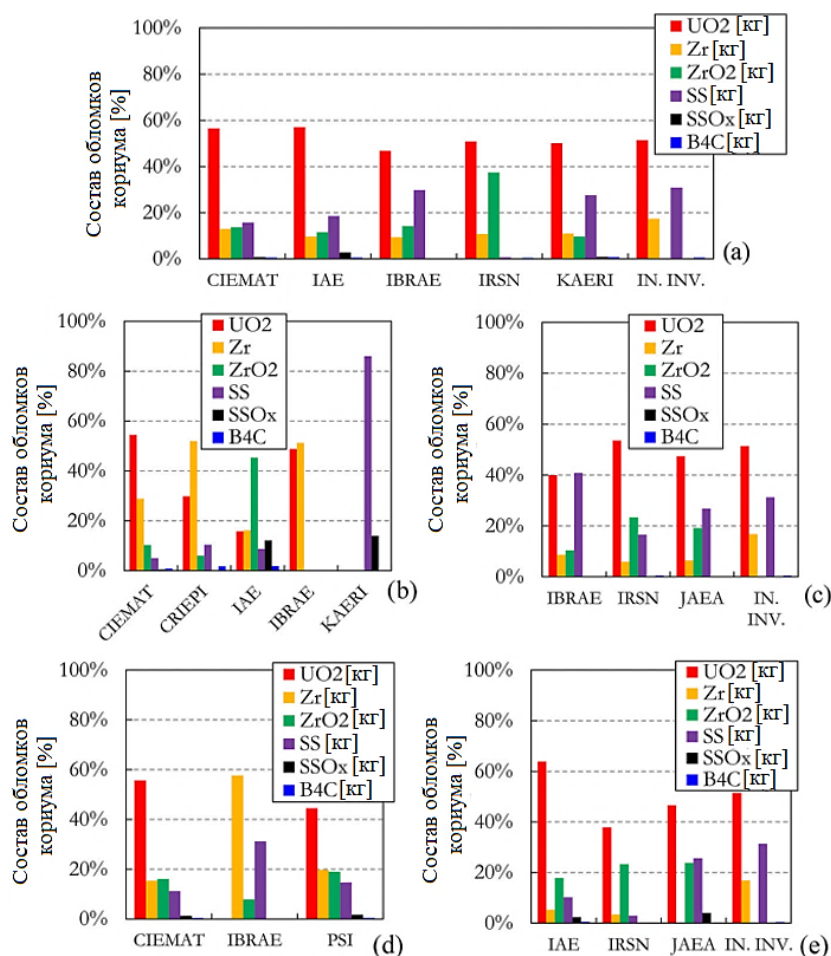


Рисунок 5 – Рассчитанный состав элементов кориума на АЭС Фукусима Дайити, располагающихся: (а) за пределами корпуса реактора энергоблока 1; (б) в нижней части корпуса реактора энергоблока 2; (с) за пределами корпуса реактора энергоблока 2; (д) в нижней части корпуса реактора энергоблока 3; (е) за пределами корпуса реактора энергоблока 3 ^[18] [Calculated composition of corium elements at the Fukushima Daiichi NPP located: (a) outside of the Unit 1 reactor vessel; (b) at the Unit 2 reactor vessel bottom; (c) outside the Unit 2 reactor vessel; (d) at the Unit 3 reactor vessel bottom; (e) outside the Unit 3 reactor vessel]

Из анализа представленных результатов можно сделать следующие выводы:

- около 50% элементов кориума состоят из UO₂ (включая ПД);
- результаты 2/3 всех расчётов показывают, что около 10% элементов кориума представляет собой различные оксиды циркония, и ещё около 10% состоят из циркония в металлической форме, который был сформирован вследствие быстропротекающих и быстроизменяющихся переходных процессов;
- во всех проведенных расчётах относительное количество оксидов железа в кориуме невелико или почти ничтожно, в то время как процент содержания нержавеющей стали (SS) колеблется от 10% до 30%;
- согласно результатам исследования, в кориуме должно наблюдаться присутствие B₄C, но его количество представляет собой чрезвычайно низкое значение в процентном отношении.

Стоит отметить, что представленные результаты, полученные различными организациями, противоречат друг другу. В связи с этим, при разработке комплекса данных по кориуму необходимо учесть разноречивые данные путем формирования системы различных вариантов набора характеристик кориума, включающую в себя граничные случаи, наиболее отличающиеся друг от друга в ряде параметров.

Наличие системы различных вариантов набора характеристик кориума является важной составляющей процесса ликвидации последствий аварии. Однако остается открытым вопрос об исследовании реальных образцов кориума. Существуют различные методы оценки свойств, структуры и состава проб, содержащих ядерные материалы, однако одним из наиболее используемых методов является метод гамма-спектрометрии. Вопрос определения изотопного состава и других характеристик различных объектов и смесей, содержащих ядерные материалы, является важной задачей во многих направлениях, связанных как с обеспечением ядерной безопасности, так и с производственными, транспортными и перерабатывающими операциями ядерного топливного цикла. Большинство ядерных материалов, представляющих интерес с точки зрения определения структуры и состава ядерных материалов в образце, испускают гамма-излучение. Спектр гамма-излучения позволяет определить изотопный состав, а в совокупности с измерением интенсивности излучения и количественные характеристики ядерных материалов в образце. Методы контроля состава делятся на разрушающие и неразрушающие. Последние разделяются на пассивные, которые основаны на измерении излучений, сопровождающих спонтанные ядерные процессы в веществе, и активные, использующие внешние источники для возбуждения излучения исследуемого образца. Методы неразрушающего анализа наиболее часто применяются в случаях, когда невозможно произвести представительную выборку и когда разрушающие исследования невыполнимы. В свою очередь, разрушающие анализы непригодны в случаях, когда материал недоступен для отбора, информация нужна немедленно или стоимость анализа слишком велика. Проведение в дальнейшем подобных измерений с образцами кориума позволит собрать данные, обеспечивающие возможность проведения верификации модели кориума, построенной на основе комплекса данных, сбор данных для создания которого проводится в данном обзоре.

Исследование геометрии и морфологии образования отдельных элементов кориума

Исходя из ранее представленных и описанных результатов исследований, можно утверждать, что при использовании проанализированных методов пассивной неразрушающей комбинированной гамма-нейтронно-спектрометрии можно не только оценить состав содержащихся ядерных материалов в объекте, но и учесть нерегулярность и асимметрию анализируемых образцов кориума. Кроме того, из анализа последствий аварии на ТМІ-2, проведенного ранее, было получено распределение образцов кориума по размеру [7]. Таким образом, для формирования конечного комплекса геометрических и структурных параметров кориума необходимо провести анализ работ по исследованию структуры кориума, образовавшегося в результате аварии АЭС Фукусима Дайити. Это необходимо для оценки коэффициентов учёта геометрии и месторасположения образца для формирования граничных случаев.

Часть данных можно извлечь из ранее рассмотренных исследований [5-6], проводимых в отношении структуры и состава кориума, образовавшегося в результате аварии на ТМІ-2. В дополнение к этим исследованиям были проанализированы работы [19-21], посвященные вопросу взаимодействия кориума с бетоном, его морфологии и процесса фазообразования в процессе расплава. Часть данных была также дополнительно подтверждена результатами исследований ядерных материалов на территории Чернобыльской АЭС и исследованиями вопроса теплопроводности сплавов, образовавшихся в процессе аварии на АЭС Фукусима Дайити [22].

В работе [23] проводилось исследование распределения нуклидов в формируемом в процессе плавления материалов активной зоны кориуме. В данной работе проводился полноценный эксперимент по моделированию расплава смеси ядерных и конструкционных материалов, составляющих основную массу материалов активной

зоны реактора. Расплавление проводилось при температуре, близкой к наблюдавшейся в активной зоне реактора на АЭС Фукусима Дайити в процессе аварии, что позволяет провести экстраполяцию результатов исследований на реальный кориум, образовавшийся в процессе аварии.

На рисунках 6-7 представлены разрез образца кориума, образовавшегося в результате эксперимента и состав образцов, взятых из отдельных частей образовавшегося образца.

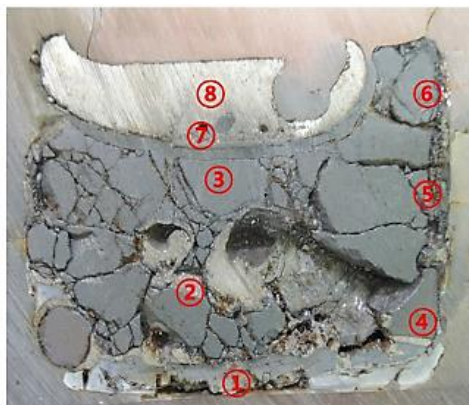


Рисунок 6 – Разрез образца кориума, полученного в процессе эксперимента, с указанием зон забора образцов [Cross-section of the corium sample obtained during the experiment, indicating the areas of sampling]

№ образца	Zr	U	O	Ni	Fe	Cr	B
1	63.5	11.8	23.0	0.05	1.1	0.46	0.07
2	29.8	51.3	17.2	0.11	1.2	0.31	0.06
3	30.1	51.0	17.4	0.08	1.1	0.24	0.05
4	2.2	82.7	12.1	0.03	2.9	0.04	0.03
5	22.6	60.1	15.8	0.08	1.1	0.20	0.07
6	28.9	53.1	17.2	0.08	0.47	0.21	0.03
7	20.9	17.9	2.6	4.9	40.8	10.2	2.7
8	19.6	12.8	2.3	5.1	46.1	11.0	3.1

Рисунок 7 – Фактическое процентное элементное соотношение материалов из образцов, взятых в соответствии с рисунком 6 [Actual percentage of elemental ratio of materials from samples taken in accordance with Figure 6]

Исходя из результатов исследований [21], можно определить не только максимальные температуры в активной зоне реактора в процессе аварии (представлены на рисунке 8), но и оценить морфологию расплава при образовании кориума. Исследователи делают вывод, что примерно 25% всего топлива находилось в жидкой фазе. Такие материалы, как В₄С (органы СУЗ), SS (оболочки СУЗ, нержавеющая сталь) UO₂ (ТВЭЛ) и Zircaloy (оболочка ТВЭЛ) подверглись плавлению, так как температуры плавления данных материалов составляют 1477 К (В₄С, SS) и 2170 К (UO₂, Zircaloy).

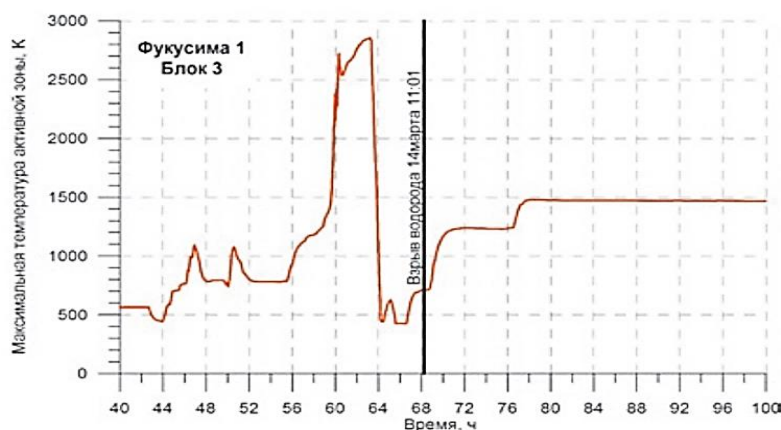


Рисунок 8 – Максимальная температура энергоблока 3 АЭС Фукусима Дайити в процессе аварии [Maximum temperature of Fukushima Daiichi Unit 3 during the accident] [21]

Результатом проведенного анализа являются данные о температуре плавления отдельных материалов активной зоны, а также данные по их релокации в процессе формирования кориума. Исходя из этих сведений, можно судить о возможной структуре и составе элементов кориума в различных случаях с учётом их конечного местоположения по объёму активной зоны.

Оценка нуклидного состава образцов кориума на основе проведённых исследований и данных мониторинга эксплуатации АЭС Фукусима Дайити

На первом этапе оценки определялся нуклидный состав активной зоны в момент аварии, глубина выгорания, температура взаимодействия в процессе формирования кориума и т.д.

Рассматривать нуклидный состав было решено на примере третьего энергоблока в связи с наибольшим доступным объемом данных в обнаруженных источниках. В таблицах 4-5 представлены эксплуатационные характеристики для третьего энергоблока АЭС Фукусима Дайити и начальный состав активной зоны третьего энергоблока.

В работе [15] состав загрузки активной зоны третьего энергоблока (представлен в таблице 5) был использован в расчёте выгорания для учёта облучения топлива в процессе эксплуатации АЭС Фукусима Дайити до момента аварии. Также в данной работе приведены нуклидные составы с учётом распада с момента аварии до 11 марта 2021 года (10 лет). Таким образом, эти данные наиболее точно отражают нуклидный состав активной зоны третьего энергоблока АЭС Фукусима Дайити. Представленные данные обладают необходимой полнотой для создания модели.

На основе собранных данных были определены коэффициенты учёта перехода материалов в кориум. Данные коэффициенты, описывающие доли групп нуклидов в материале, представлены в таблице 6. Представленные коэффициенты усреднены по активной зоне и сгруппированы для отдельных, наиболее отличающихся результатов исследований различных организаций. Таким образом, рассматриваются две области нахождения кориума, а именно за пределами корпуса реактора и внутри корпуса реактора.

Таблица 4 – Эксплуатационные параметры энергоблоков АЭС Фукусима Дайити ^[16] [Operating parameters of power units of the Fukushima Daiichi NPP]

Параметр	Единица измерения	Энергоблок 3
Тип реактора	-	BWR-4
Тепловая мощность реактора	МВт	2381
Обогащение по U ²³⁵	Весовой %	3,7
Число ТВС	Шт.	548
Масса делящегося материала в АЗ	т НМ*	94
Удельная мощность	МВт/т	25,3
Средний уровень выгорания	ГВт*день/т	21,8

*т НМ – тонна тяжелых металлов

Таблица 5 – Состав топлива и оболочек энергоблока 3 (г/т НМ) ^[14] [Composition of fuel and claddings of power unit 3 (g/tNM)]

Нуклид	Урановое топливо	MOX Топливо
U-234	-	154
U-235	37 000	17 962
U-236	-	116
U-238	963 000	953 142
Pu-238	-	438
Pu-239	-	16 802
Pu-240	-	7 621
Pu-241	-	2 382
Pu-242	-	1 148
Am-241	-	235
O	134 538	
Cr	204	
Fe	530	
Ni	102	
Zr	200 118	
Sn	2977	

Таблица 6 – Коэффициенты учёта расположения элементов кориума для формирования крайних случаев на основе исследования энергоблока 3 АЭС Фукусима Дайити [Coefficients for taking into account the location of corium elements for the formation of extreme cases based on the study of power unit 3 of the Fukushima Daiichi NPP]

Группа нуклидов	в нижней части корпуса реактора		за пределами корпуса реактора	
	Сценарий 1 (на основе результатов исследований СИМАТ/PSI)	Сценарий 2 (на основе результатов исследований IBRAE)	Сценарий 3 (на основе результатов исследований IRSN)	Сценарий 4 (на основе результатов исследований IN. INV.)
Топливо (UO_2/U_3O_8) и ПД	0,50	0,59	0,57	0,51
Оксиды циркония	0,18	0,09	0,343	0
Цирконий в металлической форме	0,18	0	0,051	0,165
SS (нержавеющая сталь)	0,12	0,32	0,036	0,31
Оксиды SS	0,01	0	0,0	0
B_4C	0,01	0	0,0	0,015

Ранее описанный алгоритм определения количеств ядерных материалов в образце на основе неразрушающих методов гамма-спектрометрии использует математическую модель, в которой проводится оценка соотношений изотопов цезия. Таким образом, необходимо провести оценку коэффициентов перехода изотопов цезия из активной зоны в состав кориума. В процессе проведения литературного обзора работ на данную тематику были обнаружены необходимые данные в работах по исследованию процесса аварии на АЭС Фукусима Дайити с использованием специализированных программ [21]. Одним из результатов исследований этих работ являются данные о выходе ряда нуклидов из твэлов в окружающую среду [23]. По данным исследователей в результате аварии 72% йода и цезия, содержащихся в твэлах, были высвобождены и попали в окружающую среду, в том числе в составе кориума.

Кроме данных о выходе нуклидов из АЗ, в работе [22] проводилось исследование возможного состава кориума. Так как эти данные были получены в результате стороннего исследования, проводимого вне проекта BSAF, результаты исследований из данной работы можно использовать для формирования ещё одного крайнего случая набора параметров моделирования кориума. Результаты исследований из вышеописанной работы, представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Количественная оценка групп нуклидов в составе кориума, проведенная в работе [22] [Quantitative assessment of groups of nuclides in the composition of the corium, carried out in]

Группа нуклидов	Количество, кг.	
	Цельный пласт кориума	Отдельные частицы кориума
UO_2	2 050,0	34 500,0
U_3O_8	2 050,0	7 200,0
Zr	636,0	7 200,0
ZrO_2	1 190,0	16 700,0
Fe	5 630,0	2 380,0
FeO	3 950,0	712,0
B_4C	0,4	679,0
Количество по зонам	15 506,4	69 191,0
Общее количество	84 697,4	

Коэффициенты, представленные в таблице 6, оценочные количества нуклидов в таблице 7 и состав активной зоны реакторов АЭС Фукусима Дайити на момент аварии описанный ранее, позволяют оценить количественный состав элементов кориума, что необходимо для создания наиболее точного описания комплекса характеристик кориума.

Заключение

В результате проведенной работы был проведен литературный обзор на тему формирования кориума в процессе аварии на АЭС Фукусима Дайити, а также изучены его характеристики через анализ результатов научных работ, находящихся в открытом доступе. В процессе работы было проведено сравнение условий формирования кориума в авариях на АЭС Фукусима Дайити и АЭС Три-Майл-Айленд, в результате которого было вынесено заключение о возможности использования части данных по аварии на АЭС Три-Майл-Айленд для формирования комплекса характеристик кориума, образовавшегося в результате аварии на АЭС Фукусима Дайити. На основе собранных параметров и характеристик был сформирован комплекс данных, который в дальнейшем может быть использован для расширенного моделирования элементов кориума. Сформированный комплекс данных включает в себя как геометрические параметры, так и нуклидный состав элементов кориума в зависимости от их месторасположения.

На основе данных мониторинга эксплуатации АЭС Фукусима Дайити, результатов расчётов в нескольких научных работах и теоретических моделей перераспределения состава активной зоны в процессе образования кориума был сформирован нуклидный состав кориума в виде нескольких крайних случаев, отличающихся в доле соотношении групп нуклидов в составе. Необходимость формирования нескольких крайних случаев была вызвана значительными отличиями в заключениях различных научных коллективов и организаций о составе кориума и служит для повышения научной объективности результатов дальнейших работ по расчёту моделей, сформированных на основе параметров и характеристик из вышеописанного комплекса данных.

Для формирования крайних случаев был объяснен метод выбора коэффициентов учета, который включает в себя процесс формирования коэффициентов учёта перехода нуклидов из активной зоны в кориум, а также месторасположение формируемого кориума и морфологию процесса его формирования.

Комплекс данных содержит в себе информацию о распределении элементов кориума, по размеру, плотности и количественному содержанию урана в составе на основе исследования кориума образовавшегося в результате аварии на ТМІ-2.

Собранные данные полезны не только для создания модели кориума, но и подготовки к проведению гамма- и нейтронно-спектрометрических измерений проб кориума, что позволит провести верификацию модели.

Таким образом, данные по расчёту моделей элементов кориума, которые в дальнейшем будут проведены на основе сформированного комплекса, могут быть верифицированы с помощью экспериментального анализа элементов кориума с использованием неразрушающей гамма-спектрометрии.

Источник финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Соглашение о предоставлении гранта в форме субсидии от 28 октября 2021 г. № 075-15-2021-1393 (дополнительные соглашения № 075-15-2021-1393/1 от 29 марта 2022 г., № 075-15-2021-1393/2 от 22 апреля 2022 г.).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Нейтронно-физическое моделирование подкритической системы с частицами кориума и водой из международного бенчмарка / А.Д. Смирнов, Е.В. Богданова, П.А. Пугачев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2020. – № 2. – С. 135-145. – DOI 10.26583/npe.2020.2.12.
2. Rogovin, M. Three Mile Island. A report to the commissioners and to the public. Nuclear regulatory commission special inquiry group / Mitchell Rogovin. – University of Michigan Library. – 1980. – 488 p.

3. Akers, D.W. TMI-2 Examination Results from the OECD/CSNI program. / D.W. Akers, G. Bart, P. Botoomley, A. Brown, D.S. Cox, P. Hoffman, S.M. Jensen, H. Kleykamp, A.J. Manley, L.A. Neimark, M. Trotabas. – Idaho National Engineering Laboratory, Inc. – 1992. – 494 p.
4. Reactor core materials interaction at very high temperatures / P. Hofmann, S.J. Hagen, G. Schanz, A. Skokan // *Nuclear Technology*. – 1989. – Volume 87, № 1. – P. 146-186.
5. Trotabas, M. TMI-2 core materials examination at Commissariat A L'Energie Atomique / M. Trotabas, J. Duco // *Nuclear Technology*. – 1989. – Volume 87, № 1. – P. 104-119.
6. Bottomley, D.W. Final report of the metallurgical examination of samples extracted from the damaged TMI-2 reactor core / D.W. Bottomley, M. Coquerelle. – Joint Research Centre. – 1990. – 16 p.
7. Akers, D.W. Lower vessel Debris Examination result. – 1989. – 18 p.
8. In-Vessel Retention of Molten Corium: Lessons Learned and Outstanding Issues / J.L. Rempe, K.Y. Suh, F.B. Cheung, S.B. Kim // *Nuclear Technology*. – 2017 – Том 161, № 3. – P. 210-267.
9. Nagase, F. Thermal properties of Three Mile Island Unit 2 core debris and simulated debris / F. Nagase, H. Uetsuka // *Journal of Nuclear Science and Technology*. – 2012. – Volume 49, № 1. – P. 96 – 102.
10. Gauntt, R-O. MELCOR Computer Code Manuals. Primer and User's Guide Version 1.8.5 Vol. 1/ R-O. Gauntt, R.K. Cole, C.M. Erickson, R.G. Gido, R.D. Gasser, S.B. Rodriguez, M.F. Young. – Sandia National Laboratories. – 2000. – 1170 p.
11. MAAP4 Applications Guidance. Desktop Reference for Using MAAP4 Software, Revision 2. – EPRI, Palo Alto. – 2010. – 564 p.
12. Feasibility study of passive gamma spectrometry of molten core material from Fukushima Daiichi Nuclear Power Station unit 1, 2, and 3 cores for special nuclear material accountancy – low-volatile FP and special nuclear material inventory analysis and fundamental characteristics of gamma-rays from fuel debris / H. Sagara, H. Tomikawa, M. Watahiki, Y. Kuno // *Journal of Nuclear Science and Technology*. – 2014. – Volume 51, № 1. – P. 1–23.
13. Nakahara, Y. Technical development on burn-up credit for spent LWR fuels JAERITECH 2000-071 / Y. Nakahara, K. Suyama, T. Suzaki. – Ibaraki: Japan Atomic Energy Research Institute, 2000. – 394 p.
14. Nishihara, K. Estimation of fuel compositions in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant JAEA-Data/Code 2012-018 / K. Nishihara, H. Iwamoto, K. Suyama. – Ibaraki: Japan Atomic Energy Agency, 2012. – 190 p.
15. TEPCO Report. Establishing permit application of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station; unit 2. – Tokyo: TEPCO, 2003. – 509 p.
16. NEA OECD, Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Summary Report. NEA/CSNI/R(2015)18. – NEA OECD, 2015. – 53 p.
17. Development of Molten Core Relocation Analysis Module MCRA in the Severe Accident Analysis Code SAMPSON / H. Ujita, N. Satoh, M. Naitoh, M. Hidaka, N. Shirakawa, M. Yamagishi // *Journal of Nuclear Science and Technology*. – 2000. – Volume 37, № 3. – 225-236 p.
18. Benchmark study of the accident at the Fukushima Daiichi NPS: Best-estimate case comparison / M. Pellegrini, K. Dolganov, L. E. Herranz [et al.] // *Nuclear Technology*. – 2016. – Vol. 196. – No 2. – P. 198 – 210. – DOI 10.13182/NT16-63.
19. Tokyo Electric Power Company Fukushima Daiichi Nuclear Power Station facilities overview / Tokyo Electric Power Company // URL: https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/outline_f1/index-e.html (accessed: 13.08.2022).
20. NEA OECD Burn-up Credit Criticality Safety Benchmark Phase III-C / NEA OECD. – Nuclear Science Committee, 2016. – 255 p.
21. Результаты экспресс-расчетов тяжелой аварии на АЭС «Фукусима-1» при помощи кода СОКРАТ / К. С. Долганов, А. В. Капустин, А. Е. Киселев [и др.] // Авария на АЭС «Фукусима-1»: опыт реагирования и уроки : Труды ИБРАЭ РАН; Продолжающееся издание «Труды ИБРАЭ РАН», 2007 (год основания). – Москва: Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Российской академии наук «Издательство «Наука», 2013. – С. 67-79.
22. Analysis of accident progression of Fukushima Daiichi NPP by the SAMPSON code / M. Naitoh, M. Pellegrini, H. Suzuki, H. Mizouchi, H. Okada // *Nuclear Technology*. – 2014. – Volume 186, № 2. – 255 – 262 p.
23. Main result of study on the interaction between the corium and melt and steel in the VVER-1000 reactor vessel during a severe accident performed under MASCA project / V.G. Asmolov, V.N. Zagryazkin, F.D. Tsurikov, V.Yu. Vishnevsky, Ye.K. D'yakov, A. Yu. Kotov, V. M. Repnikov // *Journal of Physics of Atomic Nuclei*. – 2010. – Volume 73, № 14. – 2301 – 2318 p.

REFERENCES

- [1] Nejtronno-fizicheskoe modelirovanie podkriticheskoy sistemy s chasticami koriuma i vodoj iz mezhdunarodnogo benchmarka [Neutronic Modeling of a Subcritical System with Corium Particles and Water from International Benchmark] / A.D. Smirnov, E.V. Bogdanova, P.A. Pugachev, I.S. Saldikov, M.Yu. Ternovyykh, G.V. Tikhomirov., H. Takezava, T. Muramoto, D. Nishiyama, T. Obara // *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika* [News of Higher Education Institutions. Nuclear Power Engineering]. 2020. № 2. P. 135-145 (in Russian)
- [2] Rogovin, M. Three Mile Island. A Report to the Commissioners and to the Public. Nuclear Regulatory Commission Special Inquiry Group / Mitchell Rogovin. – University of Michigan Library. – 1980. – 488 p. (in English)
- [3] Akers, D.W. TMI-2 Examination Results from the OECD/CSNI program. / D.W. Akers, G. Bart, P. Botoomley, A. Brown, D. S. Cox, P. Hoffman, S.M. Jensen, H. Kleykamp, A.J. Manley, L.A. Neimark, M. Trotabas. – Idaho National Engineering Laboratory, Inc. 1992. – 494 p. (in English)
- [4] Reactor Core Materials Interaction at Very High Temperatures / P. Hofmann, S.J. Hagen, G. Schanz, A. Skokan // *Nuclear Technology*. – 1989. – Volume 87, № 1. – P. 146-186 (in English)
- [5] Trotabas, M. TMI-2 Core Materials Examination at Commissariat A L'Energie Atomique / M. Trotabas, J. Duco // *Nuclear Technology*. – 1989. – Volume 87, № 1. – P. 104-119 (in English)
- [6] Bottomley, D.W. Final Report of the Metallurgical Examination of Samples Extracted from the Damaged TMI-2 Reactor Core / D.W. Bottomley, M. Coquerelle. – Joint Research Centre. – 1990. – 16 p. (in English)
- [7] Akers, D.W. Lower Vessel Debris Examination Result. – 1989. – 18 p. (in English)
- [8] In-Vessel Retention of Molten Corium: Lessons Learned and Outstanding Issues / J.L. Rempe, K.Y. Suh, F.B. Cheung, S.B. Kim // *Nuclear Technology*. 2017 Volume 161, № 3. P. 210-267. (in English)
- [9] Nagase, F. Thermal properties of Three Mile Island Unit 2 core debris and simulated debris / F. Nagase, H. Uetsuka // *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2012. Volume 49, № 1. P. 96 – 102. (in English)
- [10] Gauntt, R-O. MELCOR Computer Code Manuals. Primer and User's Guide Version 1.8.5 Vol. 1/ R-O. Gauntt, R.K. Cole, C.M. Erickson, RIG. Gido, R.D. Gasser, S.B. Rodriguez, M.F. Young. – Sandia National Laboratories. 2000. 1170 p. (in English)
- [11] MAAP4 Applications Guidance. Desktop Reference for Using MAAP4 Software, Revision 2. – EPRI, Palo Alto. 2010. – 564 p. (in English)
- [12] Feasibility Study of Passive Gamma Spectrometry of Molten Core Material from Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 1, 2, and 3 Cores for Special Nuclear Material Accountancy – Low-Volatile FP and Special Nuclear Material Inventory Analysis and Fundamental Characteristics Of Gamma-Rays from Fuel Debris / H. Sagara, H. Tomikawa, M. Watahiki, Y. Kuno // *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2014. Volume 51, № 1. P. 1 – 23 (in English)
- [13] Nakahara, Y. Technical Development on Burn-Up Credit for Spent LWR Fuels JAERITECH 2000-071 / Y. Nakahara, K. Suyama, T. Suzaki. – Ibaraki: Japan Atomic Energy Research Institute, 2000. – 394 p. (in English)
- [14] Nishihara, K. Estimation of Fuel Compositions in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant JAEA-Data/Code 2012-018 / K. Nishihara, H. Iwamoto, K. Suyama. – Ibaraki: Japan Atomic Energy Agency, 2012. – 190 p. (in English)
- [15] TEPCO Report. Establishing Permit Application of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station; unit 2. – Tokyo: TEPCO, 2003. – 509 p. (in English)
- [16] NEA OECD, Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Summary Report. NEA/CSNI/R(2015)18. – NEA OECD, 2015. – 53 p. (in English)
- [17] Development of Molten Core Relocation Analysis Module MCRA in the Severe Accident Analysis Code SAMPSON / H. Ujita, N. Satoh, M. Naitoh, M. Hidaka, N. Shirakawa, M. Yamagishi // *Journal of Nuclear Science and Technology*. – 2000. – Volume 37, № 3. – 225-236 p. (in English)
- [18] Pellegrini M. Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi NPS: Best-Estimate Case Comparison / M. Pellegrini, K. Dolganov, L. E. Herranz, H. Bonneville, D. Luxat, M., Sonnenkalb, J. Ishikawa, J.H. Song, R.O. Gauntt, L. Fernandez Moguel, F. Payot, Y. Nishi // *Nuclear Technology*. – 2016. – Volume 196, № 2. – P. 198–210 (in English)
- [19] Tokyo Electric Power Company Fukushima Daiichi Nuclear Power Station facilities overview / Tokyo Electric Power Company // URL: https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/outline_f1/index-e.html (accessed: .08/13/2022) (in English)
- [20] NEA OECD Burn-up Credit Criticality Safety Benchmark Phase III-C / NEA OECD. – Nuclear Science Committee, 2016. – 255 p. (in English)
- [21] Rezul'taty ekspress-raschetov tyazhelej avarii na AES "Fukusima-1" pri pomoshchi koda SOKRAT

- [Results of Express Calculations of a Severe Accident at the Fukushima-1 NPP Using the SOCRATES Code] / K.S. Dolganov, A.V. Kapustin, A.E. Kiselev, N.A. Mosunova, V.D. Ozrin, D.Yu. Tomashchik, V.F. Strizhov, S.V. Tsaun, T.A. Yudina // *Avariya na AES "Fukushima-1": opyt reagirovaniya i uroki* : TRUDY IBRAE RAN; Prodolzhayushcheesya izdanie «Trudy IBRAE RAN» [Proceedings of IBRAE «Accident at the Fukushima-1 NPP: Response Experience and Lessons»]. Moskva: Akademicheskij nauchno-izdatel'skij, proizvodstvenno-poligraficheskij i knigorasprostranitel'skij centr Rossijskoj akademii nauk "Izdatel'stvo "Nauka" [Moscow: Academic Scientific-Publishing, Production-Polygraphic and Book-Distribution Centre of the Russian Academy of Sciences, Nauka Publishing House]. 2013. № 13. 67-79 p. (in Russian)
- [22] Analysis of Accident Progression of Fukushima Daiichi NPP by the SAMPSON code / M. Naitoh, M. Pellegrini, H. Suzuki, H. Mizouchi, H. Okada // *Nuclear Technology*. 2014. Volume 186, № 2. 255-262 p. (in English)
- [23] Main result of study on the interaction between the corium and melt and steel in the VVER-1000 reactor vessel during a severe accident performed under MASCA project / V.G. Asmolov, V.N. Zagryazkin, F.D. Tsurikov, V.Yu. Vishnevsky, Ye.K. D'yakov, A.Yu. Kotov, V.M. Repnikov // *Journal of Physics of Atomic Nuclei*. 2010. Volume 73, № 14. 2301 – 2318 p. (in English)

Analysis of Methods and Technologies for Composition Assessing of Corium Formed as a Result of the Fukushima Daiichi NPP Accident

© 2022 Sergey N. Ryzhov¹, Ekaterina V. Bogdanova², Aleksandr A. Ryzhkov³,
Pavel A. Pugachev⁴, Georgiy V. Tikhomirov⁵, Mikhail Yu. Ternovkykh⁶,
Tatiana B. Aleeva⁷

^{1,2,3,4,5,6,7}*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

¹*SNRyzhov@mephi.ru, ORCID iD: 0000-0002-1801-7615, WoS Researcher ID: GPG-4006-2022*

²*EV Bogdanova@mephi.ru, ORCID iD: 0000-0002-8184-2124, WoS Researcher ID: P-1554-2017*

³*AARyzhkov@mephi.ru*

⁴*PAPugachev@mephi.ru, ORCID iD: 0000-0002-8175-3957, WoS Researcher ID: AAV-2301-2021*

⁵*GVTikhomirov@mephi.ru, ORCID iD: 0000-0002-5332-7272, WoS Researcher ID: B-7860-2013*

⁶*MYTernovkykh@mephi.ru, ORCID iD: 0000-0002-9830-5501*

⁷*TBAleeva@mephi.ru*

Abstract. This paper analyzes the methods and technologies for assessing the method of formation, composition, characteristics and features of corium, which is a mixture of nuclear and structural materials of the nuclear reactor core, formed as a result of an accident accompanied by partial or complete core melting. The study is based on data from the study of corium formed as a result of the accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plant, which are in the public domain and are the result of the work of many scientific organizations around the world. Corium research is one of the main issues in the framework of improving nuclear safety in the future and is one of the objectives of the successful procedure for eliminating the consequences of the accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plant. Without a detailed analysis of the neutronic, materials science, gravimetric and other characteristics of the corium, as well as the creation of a complex model of the corium that combines these data, it is impossible to organize an efficient and safe process for removing nuclear materials from the damaged units of the Fukushima Daiichi nuclear power plant. The objective of this work is to combine the existing research results into a data set that allows modeling of the corium using neutronic calculation codes and includes such data as the size, density and morphology of corium samples and their approximate nuclide composition. Such modeling allows not only to perform tasks related to increasing the level of safety in the implementation of the procedure for eliminating the consequences of the accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plant, but also to serve as an international benchmark for modeling a mixture containing nuclear materials.

Keywords: Fukushima, corium, accident, neutron physics simulation, review, gamma ray spectrometry, Three Mile Island, decontamination, core meltdown, nuclide composition, nuclear fuel.

For citation: Ryzhov S.N., Bogdanova E.V., Ryzhkov A.A., Pugachev P.A., Tikhomirov G.V., Ternovkykh M.Yu., Aleeva T.B. Analysis of methods and technologies for assessing the composition of corium formed as a result of the accident at the Fukushima Daiichi NPP // *Global Nuclear Safety*. 2022. № 3(44). P. 5-21. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-03-01>

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 621.039:621.311.25:005.8
doi: 10.26583/gns-2022-03-02

**ПОДХОДЫ К ОКАЗАНИЮ УСЛУГ НА ЭТАПЕ СООРУЖЕНИЯ
АТОМНЫХ СТАНЦИЙ ЗА РУБЕЖОМ**

© 2022 Сальникова Анастасия Андреевна¹, Гудеменко Дмитрий Владимирович²

^{1,2} Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» по реализации капитальных проектов, Москва, Россия
¹salnikova-aa@rosenergoatom.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5150-2383>
²gudemenko-dv@rosenergoatom.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2097-6556>

Аннотация. Рассмотрено географическое распределение стран, приступающих к реализации первых проектов сооружения атомных станций (АС) большой мощности, обозначены риски, оказывающие влияние на строительство. Проанализированы возможные последствия, возникающие в результате реализовавшегося риска в странах, впервые приступающих к реализации проектов строительства АС, в частности, увеличение стоимости строительства АС, увеличение продолжительности ее строительства. Обозначены меры, к которым прибегают страны-новички для успешной реализации проекта и митигации рисков. Рассмотрена необходимость сопровождения сооружения АС и своевременной подготовки к её эксплуатации. Проведен анализ подходов российской эксплуатирующей организации к оказанию таких услуг на этапе строительства АС за рубежом, выявлена слабая конкурентоспособность подхода «архитектор-инженер», обосновано предпочтение подходов «технический заказчик» и «инженер владельца».

Ключевые слова: сооружение атомных станций, инженер владельца, технический заказчик, архитектор-инженер, эксплуатирующая организация, риск, страна-новичок, управление проектами.

Для цитирования: Сальникова А.А., Гудеменко Д.В. Подходы к оказанию услуг на этапе сооружения атомных станций за рубежом // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 3(44). – С. 22-29. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-03-02>

Поступила в редакцию 30.05.2022
После доработки 25.08.2022
Принята к публикации 05.09.2022

Введение

В настоящее время в мире запланировано сооружение более 100 энергетических реакторов общей установленной мощностью 100 000 МВт. Энергоблоки сооружаются по всему миру: и в странах, имеющих опыт сооружения АЭС (Россия, Курская АЭС-2; США, АЭС «Вогтль», энергоблоки №3,4; Китай, АЭС «Сюйдапу», АЭС «Тяньвань», АЭС «Фуцин», энергоблок №6, АЭС «Шидаовань», АЭС «Фанчэнган», АЭС «Хунъяньхэ», энергоблок №6; Венгрия, АЭС «Пакш-2», Финляндия, АЭС «Олкилуото», энергоблок №3, АЭС «Ханхикиви-1»; Южная Корея, АЭС «Шин-Ханул»), и в странах, приступающих к реализации первых проектов сооружения объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), (Турция, АЭС «Аккую»; Беларусь, Белорусская АЭС; Индия, АЭС «Куданкулам», АЭС «Калпаккам», АЭС «Какрапар», АЭС «Раджастхан»; Бангладеш, АЭС «Руппур»; Египет, АЭС «Эль Дабаа»).

Большинство реакторов, планируемых в настоящее время, располагаются в Азии в связи с быстрорастущей экономикой и растущим спросом на электроэнергию. [1]

Несмотря на конкурентные преимущества АС в сравнении с предприятиями, работающими на традиционных и возобновляемых источниках энергии, в процессе строительства атомные электростанции сталкиваются с большим количеством рисков, связанных с увеличением срока строительства и удорожанием проекта. Хотя в большинстве задержек и увеличении затрат обвиняют дополнительные требования к лицензированию, государственное вмешательство и проблемы с финансированием, растет признание того, что отсутствие надлежащего управления проектами было основным фактором таких задержек и увеличения затрат.

Управление проектами – это деятельность по достижению поставленных целей и задач проекта. Она, в первую очередь, связана с анализом, координацией и контролем хода реализации проекта с точки зрения технического качества, графика и затрат. Улучшение бюджетного контроля и ускорения выполнения проектов атомных электростанций за счет компетентного управления проектами позволит снизить затраты за счет более эффективной последовательности работ и повышения ее производительности. Как правило, в странах-новичках отсутствует должный опыт в реализации проектов капитального строительства такого уровня, что, в свою очередь, приводит к увеличению сроков строительства АС и, как следствие, к удорожанию проекта. [2]

В странах, впервые приступающих к реализации проектов строительства АС, также остро встает вопрос об отсутствии кадров, имеющих опыт реализации проектов капитального строительства и эксплуатации АС, что, в свою очередь, также приводит к увеличению сроков строительства ввиду необходимости поиска компетентных организаций, способных предоставить полную и комплексную подготовку кадров, строительства необходимых учебно-тренировочных центров и полномасштабных тренажеров для прохождения обучения на рабочем месте и обучения персонала. [3-5]

На основании вышеперечисленных причин, в странах, не имеющих достаточного опыта сооружения энергоблоков АС, существует тенденция привлечения компаний, с опытом реализации подобных проектов и обладающих необходимым количеством компетентного персонала для оказания технической поддержки стране-новичку на этапе сооружения АС (управления сроками, качеством, рисками проекта и т.д.).

На сегодняшний день существует несколько подходов к оказанию услуг на этапе сооружения АС за рубежом:

- технический заказчик;
- архитектор-инженер;
- инженер владельца.

В этой связи представляет интерес ретроспективный анализ этих подходов на начальном этапе сооружения ОИАЭ с целью выбора оптимального. Тема актуальна в связи с большим количеством проектов сооружения АС, реализуемых по всему миру. Госкорпорация «Росатом» осуществляет масштабную программу сооружения АС как в Российской Федерации, так и за рубежом. Портфель зарубежных заказов включает 35 блоков на разных стадиях реализации. [6]

Технический заказчик

В соответствии с Градостроительным кодексом Российской Федерации технический заказчик – юридическое лицо, действующее на профессиональной основе, которое уполномочено заказчиком и от имени застройщика заключают договоры о выполнении инженерных изысканий, о подготовке проектной документации, о строительстве, реконструкции, капитальном ремонте объектов капитального строительства подготавливает задания на выполнение указанных видов работ, предоставляет лицам, выполняющим инженерные изыскания и (или) осуществляющим

подготовку проектной документации, строительство, реконструкцию, капитальный ремонт объектов капитального строительства, материалы и документы, необходимые для выполнения указанных видов работ, утверждают проектную документацию, подписывают документы, необходимые для получения разрешения на ввод объекта капитального строительства в эксплуатацию, а также осуществляют иные функции, предусмотренные договором. [7] Обеспечение достижения надежности, технических характеристик, безопасности и экономических показателей АС, которые предусмотрены проектом, являются главными целями работы технического заказчика.

Именно технический заказчик контролирует ход реализации проекта на всех стадиях по нескольким направлениям, выступая на стороне заказчика, защищая его интересы. При выполнении функций, технический заказчик, в частности, организует контроль:

- реализации бизнес-плана проекта;
- качества разработки проектной документации, адекватность сметных расчетов;
- процесса согласования договора генподряда (генподрядчик заинтересован избежать ответственности за несоблюдение сроков и увеличение стоимости проекта);
- выбора основного оборудования и подписания контракта на поставку и сервисное обслуживание (поставщик стремится продать серийное оборудование с минимальным сервисом как можно дороже);
- строительно-монтажных работ (в интересах подрядчиков – строить по минимальной стоимости, не заботясь об обеспечении необходимого для ответственного объекта уровня качества);
- координации работ подрядчиков, календарно-сетевого планирования (подрядчики хотели бы отвечать за минимальный участок работы без ответственности за взаимосвязи с соседями);
- правильного оформления исполнительной документации и пр. [8]

Таким образом, технический заказчик это: а) профессиональный исполнитель, действующий в интересах заказчика строительства АС, предоставляющий профессиональные консультации, оказывающий экспертную помощь и техническую поддержку заказчику в течение всего срока сооружения АС по направлениям, определяемых заказчиком; б) надежный партнер заказчика, являющийся экспертом в вопросах организации строительных площадок, получения технических условий на подключение к инженерным сетям, финансового контроля и т.д. [9]

В Российской Федерации техническим заказчиком при строительстве российских АС является АО «Концерн Росэнергоатом».

АО «Концерн Росэнергоатом» входит в состав электроэнергетического дивизиона Госкорпорации «Росатом». Это единственная в Российской Федерации компания, выполняющая функции эксплуатирующей организации атомных электростанций (АЭС). АО «Концерн Росэнергоатом» является крупнейшей российской энергогенерирующей компанией: в общей сложности на одиннадцати АЭС эксплуатируются 37 атомных энергоблоков суммарной установленной мощностью 29,5 ГВт.

В период с 2015 г. до настоящего времени АО «Концерн Росэнергоатом», выступая техническим заказчиком, ввел в эксплуатацию следующие энергоблоки:

- Ростовская АЭС, энергоблок №3 (2015 г.);
- Белоярская АЭС, энергоблок №4 (2016 г.);
- Нововоронежская АЭС-2, энергоблок №1 (2017 г.);
- Ростовская АЭС, энергоблок №4 (2018 г.);
- Ленинградская АЭС-2, энергоблок №1 (2018 г.);
- Нововоронежская АЭС-2, энергоблок №2 (2019 г.);
- Ленинградская АЭС-2, энергоблок №2 (2021 г.).

На сегодняшний день АО «Концерн Росэнергоатом» является техническим заказчиком при строительстве 3 энергоблоков АЭС РФ: Курская АЭС-2 (энергоблоки №1 и 2), БРЕСТ-ОД-300.

За рубежом к выполнению функций аналогичных функций технического заказчика чаще привлекают независимые инжиниринговые компании, которые содержат постоянный штат высококвалифицированных технических специалистов для оказания услуг и имеют возможность после окончания какого-либо проекта не увольнять опытную команду, а переводить её на новый проект к другому заказчику. Такой подход к оказанию инжиниринговых услуг получил название «инженер владельца» (Owner's Engineer).

Инженер владельца

Инженер владельца – инжиниринговая (консалтинговая) компания, которая действует в интересах заказчика (владельца объекта) и оказывает профессиональные консультации, экспертную помощь и поддержку заказчику в течение всего срока сооружения объекта по направлениям, определяемым заказчиком в рамках заключенного контракта.

Услуги инженера владельца могут оказываться как физическим, так и юридическим лицом. Учитывая значительное количество необходимых компетенций и существенные объемы работ для оказания такого типа услуг в рамках реализации мега-проектов (сооружение АС) целесообразно привлечение профильного юридического лица. Работа над проектом начинается на ранних сроках его реализации, обычно на этапе проектирования и разработки. Во время встречи с заказчиками обсуждаются масштабы и цели проекта, а также определяются потребности, которые необходимо удовлетворить, в процессе реализации. [10]

Чаще всего инженер владельца выполняет субподрядную роль и становится участником проекта для представления интересов заказчика, а также с целью заполнения пробелов владельца в ресурсах и экспертных знаниях для проекта. В полномочия инженера владельца входит рассмотрение проектной документации и других материалов, а также мониторинг выполнения проекта. В случае выявления недостатков, он информирует заказчика для последующего определения стратегий и путей их устранения. [11] В процессе строительства инженер владельца регулярно посещает площадку и контролирует реализацию выполнения проекта посредством инспекций, основными целями которой являются соблюдение выполнения поставленных задач и использование работниками соответствующих материалов. В его обязанности может входить проведение аудитов соблюдения требований безопасности на площадке строительства АС.

В рамках оказания услуг инженер владельца готовит отчетную документацию – как правило, отчет о прогрессе/отчет о выполненных работах, в котором описывает основные оказанные услуги, результаты проведения проверок, инспекций и аудитов. В его полномочия входит организация проверок по всем направлениям его деятельности – в краткосрочной и долгосрочной перспективах инженер владельца может исключить риск увеличения стоимости проекта заказчика, убедившись, что проекты выполняются в соответствии со спецификациями и в рамках нормативных руководящих принципов, с прицелом на возможность будущих изменений в правилах, которые могут потребовать реконструкции и других корректировок. Работа подобного рода предусматривает наличие соответствующей инженерной подготовки и самосовершенствования с целью соответствия нормативным изменениям и меняющимся отраслевым стандартам.

Как правило, роль инженера владельца отделена от роли менеджера проекта. В этой связи можно говорить о том, что инженер владельца в данном подходе является второстепенным участником проекта, который осуществляет надзор за деятельностью исполняющих участников проекта на протяжении всего жизненного цикла проекта.

Функции инженера владельца часто включают:

- оценку проекта, технико-экономическое обоснование и планирование;
- оценку контрактов (техническую, не юридическую);
- мониторинг хода строительства;
- контроль соответствия оборудования и материалов техническим условиям;
- оценку проектирования и планирования;
- анализ и оптимизацию графика проекта;
- пуско-наладочные и верификационные испытания оборудования;
- обзор эксплуатации и технического обслуживания;
- анализ эффективности затрат;
- отчетность перед владельцем на основе технической компетенции. [12]

В зависимости от типа контракта роль инженера владельца предусматривает различный набор функций и обязанностей.

Примером эксплуатирующей организации, осуществляющей роль инженера владельца при строительстве зарубежных АЭС является АО «Концерн Росэнергоатом». На сегодняшний день АО «Концерн Росэнергоатом» выступает в качестве инженера владельца или оказывает услуги по направлениям деятельности инженера владельца при строительстве следующих энергоблоков зарубежных АЭС:

- АЭС «Аккую», Турция;
- АЭС «Эль-Дабаа», Египет;
- АЭС «Руппур», Народная Республика Бангладеш.

Архитектор-инженер

Архитектор-инженер – инжиниринговая фирма со схожими объемами инженерных работ с основным подрядчиком и действующая от имени владельца АС или подрядчика в соответствии с договорным соглашением. На рисунке 1 приведена организационная структура основных участников строительства АС в подходе архитектор-инженер [13].



Рисунок 1 – Организационная структура основных участников строительства АС в подходе архитектор-инженер [Organisational structure of the main participants in the construction of the plant in the architect-engineer approach]

Термин «архитектор-инженер» обычно применяется к организациям, которые специализируются на планировании, проектировании и управлении промышленными установками и зданиями.

Основными функциями архитектора-инженера являются:

- инжиниринг;

- управление проектом.

Основные обязанности архитектора-инженера:

- подготовка рабочего проекта;
- подготовка специальных спецификаций;
- подготовка инструкций по строительству;
- помощь владельцу в заключении контрактов;
- подготовка закупочной документации.

В рамках управления проектом обязанности архитектора-инженера во время выполнения проекта могут быть похожи на задачи менеджера проекта АС или главного подрядчика в зависимости от типа контракта:

1. В качестве инженерного консультанта менеджера проекта АС архитектор-инженер может помочь расширить интерес менеджера проекта и его деятельность по выполнению проекта, управлению проектом будет осуществляться как управление проектом менеджера.

2. Инженер-архитектор также может рассматриваться как инженер-подрядчик АЭС. В этом случае задачи по управлению проектом будут аналогичны задачам главного подрядчика.

3. Отчасти промежуточная и более специализированная роль архитектора-инженера может быть результатом подхода раздельной контрактации. В частности, менеджер проекта АС будет выступать в качестве главного проектировщика и координатора всего строительства АС, но передаст эту функцию в субаренду (контракт) опытной инжиниринговой компании (архитектору-инженеру). На этой должности архитектор-инженер является инженером-подрядчиком, но в тоже время берет на себя большую часть инженерно-технических функций, а также обеспечивает независимую функцию проверки и баланса основных инженерных пакетов, выполняемых подрядчиками для отдельных участков АС. Эта функция важна для технического контроля качества на предприятии.

Основные задачи и обязанности архитектора-инженера в последнем случае будут включать:

- управление собственными услугами, поставками и субподрядными услугами;
- координирование всех услуг на площадке (включая услуги третьих лиц) посредством а) оптимизации последовательности строительно-монтажных работы, б) минимизации проектных взаимодействий внутри и вне организации архитектор-инженер (в отношениях с консорциумом и субподрядчиком);
- обеспечение определения проекта в виде требований и спецификаций проекта и контроль изменений;
- обеспечение руководства по решению проблем и помощи, где это необходимо, а также создание программы анализа рисков проекта и снижения рисков;
- мониторинг всей деятельности с помощью инструментов управления проектом;
- надзор за реализацией проекта;
- внедрение и реализация программы обеспечения качества;
- подготовка лицензионной документации;
- управление контрактами и работа с предложениями и претензиями.

Заключение

В ходе работы были проанализированы три общемировых подхода к реализации проектов строительства АС за рубежом:

- технический заказчик;
- инженер владельца;
- архитектор-инженер.

В результате анализа опыта оказания услуг на этапе сооружения АС российскими и зарубежными организациями, включающем анализ объемов полномочий и типов контрактации при различных подходах можно сделать следующие основные выводы.

Для заказчика инжиниринговых услуг выбор подхода должен учитывать следующие факторы:

- длина цепочки контрактации;
- тип заключаемого контракта (ЕРС, ЕРСМ, ВОО, ВООТ и т.д.) и, как следствие, объем ответственности заказчика;
- наличие компетентного персонала, имеющего опыт реализации референтных проектов;
- взаимосвязи между организациями – участниками проекта.

В общем случае, чем больший объем обязательств остается у заказчика, тем целесообразнее привлечение подрядчика – организации, оказывающей наиболее полный комплекс услуг. Таким внешним условиям наиболее соответствует подход технического заказчика, так как применение данного подхода предусматривает ответственность и контроль за реализацию проекта по направлениям, ввод в эксплуатацию и эксплуатацию АЭС. Инженер владельца и архитектор-инженер – это инжиниринговые консалтинговые фирмы, которые не несут ответственность за реализацию проекта, а осуществляют оценку, мониторинг и анализ по направлениям проекта. В зависимости от типа контракта (split package, multiple package и т.д.) объем услуг инженера владельца может значительно варьироваться.

Подход технического заказчика и инженера владельца более комплексный, ответственность и функционал организации масштабнее и шире, что позволит закрыть пробелы в компетенциях заказчика, в особенности впервые приступающего к реализации строительства объектов использования атомной энергии, и минимизировать риски и издержки.

В отношении подхода «архитектор-инженер» стоит сделать вывод о нецелесообразности его использования ввиду наличия более современных аналогов: технического заказчика и инженера владельца.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Plans For New Reactors Worldwide // World Nuclear Association : website. – URL : <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide.aspx> (дата обращения: 27.07.2022)
2. Гудеменко, Д.В. Концерн Росэнергоатом – технический заказчик в атомной отрасли / Д.В. Гудеменко // РЭА. – 2020. – № 8. – С. 17 – 19.
3. Аспидов, В. Как закаляются кадры для зарубежных АЭС // РЭА. – 2019. – № 11. – С. 12- 16.
4. Кадровая политика // Строительство в атомной отрасли. – 2019. – № 9. – С. 42- 48.
5. Все лучшее – кадрам // Строительство в атомной отрасли. – 2019. – № 10. – С. 50- 54.
6. Строящиеся АЭС // Госкорпорация Росатом : официальный сайт. – URL: <https://rosatom.ru/production/design/stroyashchiesya-aes/> (дата обращения: 27.07.2022)
7. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 N 190-ФЗ (ред. от 14.07.2022). – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/ (дата обращения: 27.07.2021)
8. Типовые отраслевые методические рекомендации по формированию структуры подразделений, выполняющих функции застройщика и технического заказчика при реализации проектов капитальных вложений (введены в действие Приказом Госкорпорации «Росатом» от 15.07.2014 № 1/643-П). – URL: <https://www.rosatom.ru/upload/iblock/ec7/ec7d25736018ee61c2d80330ae22034e.pdf> (дата обращения: 27.07.2021)
9. АО «Концерн Росэнергоатом» – технический заказчик в атомной отрасли // АО «Концерн Росэнергоатом»: официальный сайт. – URL: <https://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/ba7/ba709f884807a10a9d196016f6a2525e.pdf>. (дата обращения: 25.06.2022).
10. J. Moore Technologies & Management Systems that Work: Current Best Practice in Nuclear New Build // OECD Workshop, Paris, March 11, 2014. – URL : <https://oecd-ne.org/ndd/workshops/pmnnb>
11. Construction Extension to the PMBOK / Project Management Institute. – Newtown : PMI, 2007. – p. 232
12. F. Berry Role of the Owner's Engineer in Technology Assessment, Licensing, Engineering and Construction / F.Berry // Vienna, 2013. – pp/53
13. IAEA, Initiating Nuclear Power Programmes: Responsibilities and Capabilities of Owners and Operators, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-1.6, Vienna: IAEA, 2009. – URL :

<https://www.iaea.org/publications/13465/initiating-nuclear-power-programmes-responsibilities-and-capabilities-of-owners-and-operators>

REFERENCES

- [1] World Nuclear Association: website. – URL: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide.aspx>. (accessed: 07/27/2022)
- [2] Gudemenko D.V. Rosenergoatom Concern – technical customer in the nuclear industry / D.V. Gudemenko // REA. – 2020. – No. 8. – pp. 17-19.
- [3] REA JSC How personnel for foreign nuclear power plants are tempered // REA. – 2019. – No. 11. pp. 12-16.
- [4] Rosatom State Corporation Personnel Policy // Construction in the nuclear industry. – 2019. – No. 9. – pp. 42-48.
- [5] Rosatom State Corporation Personnel Policy // Construction in the nuclear industry. – 2019. – No. 10. – p. 50-54.
- [6] Rosatom State Corporation: website. – URL: <https://rosatom.ru/production/design/stroyashchiesya-aes/> (accessed: 07/27/2022)
- [7] The Town-planning Code of the Russian Federation of 29.12.2004 N 190-FZ (as amended on 02.07.2021) (with amendments and additions, intro. effective from 01.10.2021), Moscow, 2004.
- [8] Order of the Rosatom State Corporation dated 15.07.2014, No. 1/643P, Standard industry guidelines for the formation of the structure of units performing the functions of a developer and technical customer in the implementation of capital investment projects, Moscow, 2014.
- [9] REA JSC URL: <https://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/ba7/ba709f884807a10a9d196016f6a2525e.pdf>. (accessed: 06/25/2022).
- [10] J. Moore Technologies & Management Systems that Work: Current Best Practice in Nuclear New Build / J. Moore // OECD Workshop, Paris, March 11, 2014.
- [11] Project Management Institute Construction Extension to the PMBOK/ Project Management Institute// PMI, Newtown, 2007.
- [12] F. Berry Role of the OWNER'S ENGINEER in Technology Assessment, Licensing, Engineering and Construction / F.Berry // Vienna, 2013.
- [13] IAEA, Initiating Nuclear Power Programs: Responsibilities and Capabilities of Owners and Operators, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-1.6, Vienna: IAEA, 2009.

Approaches to Service Provision During the Construction Phase of Nuclear Power Plants Abroad

Anastasia A. Salnikova¹, Dmitry V. Gudemenko²

Branch Office for Capital Projects Implementation, REA JSC, Moscow, Russia 115432

¹salnikova-aa@rosenergoatom.ru, ORCID iD: 0000-0001-5150-2383

²gudemenko-dv@rosenergoatom.ru, ORCID iD: 0000-0003-2097-6556

Abstract. The paper considers geographical distribution of the countries embarking on the implementation of the first projects for the construction of a large-capacity NPP. The risks affecting the construction of nuclear power plants are presented, the analysis of possible consequences is carried out, in particular, an increase in the cost of building a nuclear power plant and an increase in the duration of its construction in novice countries that are starting to implement nuclear power plant construction projects for the first time, arising as a result of the realized risk. The measures resorted to by the novice countries for the successful implementation of the project and mitigation of risks are considered. The necessity of maintenance of NPP construction and timely preparation for its operation is considered, as well as the analysis of the approaches of the Russian operating organization to the provision of such services at the stage of NPP construction abroad is carried out, the weak competitiveness of the “architect-engineer” approach is discussed, the preference is the “technical customer” and “owner's engineer” approaches is provided.

Keywords: NPP, owner's engineer, technical customer, architect-engineer, construction, operation organization, risk, newcomer country, project management.

For citation: Salnikova A.A., Gudemenko D.V. Analysis of the Experience of the Operating Organization's Participation in the Implementation of Projects for the Construction of Foreign Nuclear Power Plants // Global nuclear safety. 2022. № 3(44). P. 22-29. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-03-02>

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 621.039.56:621.311.25:519.217
doi: 10.26583/gns-2022-03-03

**ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ НАТУРНОГО ТРЕНАЖЕРА
ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДНОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭС**

© 2022 Лапкис Александр Аркадьевич¹, Калашников Максим Викторович²,
Микшин Игорь Анатольевич³

^{1,2,3}Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

¹AALapkis@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9431-7046>

²ya.mkalashnikov@ya.ru

³mikshin89@mail.ru

Аннотация. В статье приводится описание перспектив разработки и изготовления натурального тренажера обучения методам диагностики электроприводного оборудования, применяемым на АЭС. Приведен ориентировочный состав технических средств, входящих в тренажер, обоснованы его технические характеристики, описан имеющийся в ВИТИ НИЯУ МИФИ опыт применения подобного тренажера. Тренажер обучения диагностике должен включать в себя экспериментальный стенд, позволяющий имитировать реальные производственные условия эксплуатации и возможные дефекты электроприводного оборудования АЭС, а также приборный парк и методическое обеспечение, применяемые на АЭС для диагностики. Внедрение обучения методам и приемам технической диагностики с их практической отработкой на тренажере диагностики позволит повысить качество диагностического сопровождения эксплуатации электроприводного оборудования АЭС.

Ключевые слова: тренажер, диагностика, электроприводное оборудование, арматура, насос, электропривод, дефект, гидравлическая петля, ремонт, ТОиР.

Для цитирования: Лапкис А.А., Калашников М.В., Микшин И.А. Перспективы создания натурального тренажера диагностики электроприводного оборудования АЭС // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 3(44). – С. 22-69. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-03-03>

Поступила в редакцию 31.05.2022

После доработки 22.08.2022

Принята к публикации 05.09.2022

Актуальность проблемы

При эксплуатации электроприводного оборудования АЭС особое значение приобретает качество его диагностического сопровождения, которое во многом зависит от подготовки персонала, осуществляющего диагностику. Необходимым элементом подготовки является практическое обучение, поскольку обучаемый запоминает только 20 % из того, что видит, 40 % из того, что видит и слышит и 70 % того, что видит, слышит и делает. Таким образом, для качественной подготовки персонала, осуществляющего диагностику оборудования АЭС, помимо традиционных учебных материалов в виде текстовых документов, учебных слайдов и обучающих видеороликов, необходима разработка натурального тренажера, позволяющего

смоделировать работу реального электроприводного оборудования АЭС, к которому относится трубопроводная арматура, насосы и вентиляторы.

Требования к тренажеру

Тренажер обучения специалистов, участвующих в диагностике электроприводного оборудования АЭС (далее – Диагностический тренажер), необходимо разработать таким образом, чтобы с его помощью можно было моделировать физические процессы, соответствующие реальным процессам, происходящим на АЭС, а также моделировать наиболее распространенные дефекты электроприводного оборудования. При этом должна быть обеспечена также возможность применения разнородных технических средств диагностики (диагностических приборов, применяемые на АЭС) и методик, как применяемых в настоящее время, так и перспективных. Массогабаритные характеристики диагностического тренажера должны обеспечивать его размещение в помещениях учебных заведений, или учебно-тренировочных подразделений АЭС [1].

Анализ потребностей АЭС в диагностическом сопровождении эксплуатации электроприводного оборудования позволяет заключить, что тренажер для обучения специалистов по диагностике электроприводного оборудования АЭС должен включать:

- 1) Стационарный экспериментальный стенд для моделирования процессов, происходящих с электроприводным оборудованием АЭС;
- 2) Приборы, применяемые для диагностического сопровождения эксплуатации электроприводного оборудования АЭС;
- 3) Учебно-методические материалы.

Эти компоненты в комплексе представляют собой тренажер обучения методам диагностики электроприводного оборудования. Гибкость в адаптации диагностического тренажера к потребностям конкретных предприятий в обучении специалистов по диагностике заключается в возможности моделирования на стационарном экспериментальном стенде универсальных для разных предприятий физических процессов и дефектов электроприводного оборудования, а также в возможности комплектования любым диагностическим парком приборов и разнообразных методик диагностирования.

Для усвоения особенностей работы, изучения типовых дефектов, а также методов диагностики электроприводного оборудования АЭС, стационарный экспериментальный стенд должен обеспечивать возможность установки и замены основных типов электроприводного оборудования АЭС (например, с помощью фланцевых соединений).

Таким образом, экспериментальный стенд должен представлять собой систему трубопроводов и оборудования (арматура, насосы), позволяющую имитировать основные режимы работы и основные типовые дефекты электроприводного оборудования и трубопроводов.

Согласно ГОСТ 20911-89 [2] целью технического диагностирования (ТД) электроприводного оборудования на атомных станциях является определение его технического состояния. К задачам технического диагностирования относятся:

- контроль технического состояния;
- поиск места и причин неисправности;
- прогноз технического состояния ЭПО.

Для целей технического диагностирования ЭПО на АЭС применяют методы:

- анализ электрических сигналов;
- ультразвуковой;
- виброакустический;
- функциональной диагностики.

Для выполнения диагностики указанными методами на АС наиболее широко применяют следующие средства измерения:

- токоизмерительные клещи для регистрации электрических сигналов;
- пьезоэлектрические преобразователи для регистрации виброакустических сигналов;
- ультразвуковые датчики, микрофоны и щупы для регистрации ультразвуковых сигналов.

Для обработки сигналов, полученных одним из указанных выше средств измерения, применяются аналого-цифровые преобразователи (в виде модулей или отдельных устройств), а также вычислительная техника с установленным специализированным программным обеспечением.

Наибольшее распространение в технической диагностике получили готовые приборы, объединяющие функции регистрации и обработки сигналов, среди которых:

- для электрических сигналов: стенды Крона-517, Крона 517М (НПП «Крона»), ПКСОД-М (НИИ Физики РГУ), СД-10, Спрут-10 («Атомтехэнерго»), стационарные системы диагностики электроприводной арматуры (ССДЭА) различных производителей;
- для виброакустических сигналов: ТОПАЗ, ВИБРАН, серия СД и другие виброанализаторы;
- для ультразвуковых сигналов: приборы типа Ultraprobe, SDT, ЮНИСКОП.

Экспериментальный стенд

Процессы, подлежащие моделированию на стационарном экспериментальном стенде, определяются проектом энергоблока, а точнее – проектами систем, имеющих в своем составе электроприводное оборудование. Поэтому эффективность обучения персонала методам диагностики на базе собственного практического опыта будет зависеть от адекватности моделирования на экспериментальном стенде реальных производственных ситуаций и соответствующих им процессов.

Безусловно, полная имитация на тренажере условий энергоблока АЭС, таких как высокая температура и давление, приведет к неоправданно высокой стоимости его изготовления и дальнейшей эксплуатации. Поэтому целесообразно ограничиться разумными параметрами, которые не потребуют учета в территориальных органах Ростехнадзора, а также регистрации в государственном реестре опасных производственных объектов (ОПО). Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности, введенные Приказом Ростехнадзора от 25.03.2014 №116 (ред. от 12.12.2017) [3], не распространяются на котлы и трубопроводы, работающие под избыточным давлением более 0,07 мегапаскаля (МПа), при температуре воды более 115 градусов Цельсия, в связи с чем они не подлежат учету в органах Ростехнадзора. Поэтому для обеспечения промышленной безопасности, предупреждения возможных аварий, инцидентов, производственного травматизма при проектировании экспериментального стенда следует ориентироваться на эти параметры.

Оптимизация параметров экспериментального стенда с учетом вышеизложенных соображений позволяет сформировать его основные параметры:

- испытательная среда: вода техническая;
- питание стенда: от трехфазной сети переменного тока напряжением 380 В;
- потребляемая мощность: 10 кВт;
- рабочее давление: 1,6 МПа (примерно 16 кгс/см²);
- максимальное давление (при испытаниях): 2 МПа (примерно 20 кгс/см²);
- максимальный расход подачи воды на рециркуляцию: 12,5 м³/ч.

Для обеспечения указанных выше требований и технических характеристик разработана принципиальная гидравлическая схема, приведенная на рисунке 1, где

применены обозначения: КШ – краны шаровые; Н – насосы; МН – манометры; РД – регулятор давления; Б – баки (основной и опрессовочный); К – арматура (клапаны). Подача воды в систему осуществляется из бака Б-1 (емкостью 0,4 м³), установленного на высоте 1,15 м. В днище бака расположены два патрубка, один из которых соединен с всасывающим патрубком насоса, а другой соединен с нижней веткой трубопроводов Ду50. Насос Н-1 предназначен для создания давления 0,32 МПа и обеспечивает системы водой. Регулятор давления РД-1 позволяет обеспечить заданное давление, сброс воды осуществляется в боковой патрубок бака. С помощью опрессовочного насоса Н-2 в верхней ветке трубопровода при закрытых шаровых кранах КШ2 и КШ3 создается давление до 2,0 МПа.

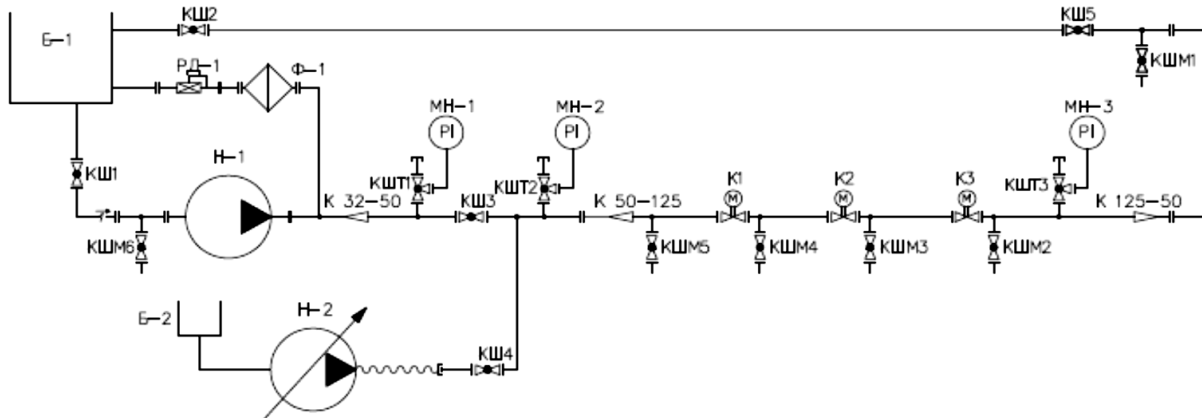


Рисунок 1 – Гидравлическая схема экспериментального стенда [Hydraulic diagram of the test stand]

В процессе проведения испытаний, а также для имитации протечек в различных типоразмерах арматуры (Ду50, Ду100, Ду150) возможна переустановка арматуры 31 (К1), присоединяемых к ней трубных блоков и отвода.

Для установки арматуры и сменных элементов стенда должны быть использованы фланцевые соединения.

Горизонтальные участки трубопроводов установлены на опоры и имеют уклон 0,002 в сторону организованного дренажа. В трубопроводах предусмотрены воздушники для возможности удаления воздуха при заполнении водой и дренажи для опорожнения системы.

Экспериментальный стенд должен быть спроектирован и изготовлен в соответствии со СНиП 3.05.05-84 [4], установка приборов, средств контроля и управления, электротехнических устройств и систем автоматизации – в соответствии с требованиями СНиП 3.05.06 – 85 [5].

Основные элементы стенда могут быть выполнены из углеродистой стали. Для нагрева воды в баке могут быть установлены регулируемые электронагревательные блоки.

Экспериментальный стенд должен быть оснащен грузоподъемным инструментом, необходимым для снятия-установки и разборки арматуры, приводов, насосов.

Конструкция экспериментального стенда должна предусматривать возможность:

- проведения работ по монтажу/демонтажу арматуры;
- установки проставок в запорный орган для имитации протечек;
- установки и крепления оборудования на месте монтажа.

Узлы и детали фланцевых соединений, рассчитанные на работу под давлением, должны обладать запасом прочности, обеспечивающим работу на максимально допустимом рабочем давлении (2 МПа).

В результате проработки принципиальной гидравлической схемы и состава оборудования, можно спроектировать экспериментальный стенд, например, как на

рисунке 2. Габаритные размеры такого стенда не превышают 7000×2000×2000 мм, что позволяет разметить его в помещениях учебно-тренировочных подразделений АЭС, или учебных центров подрядных организаций.

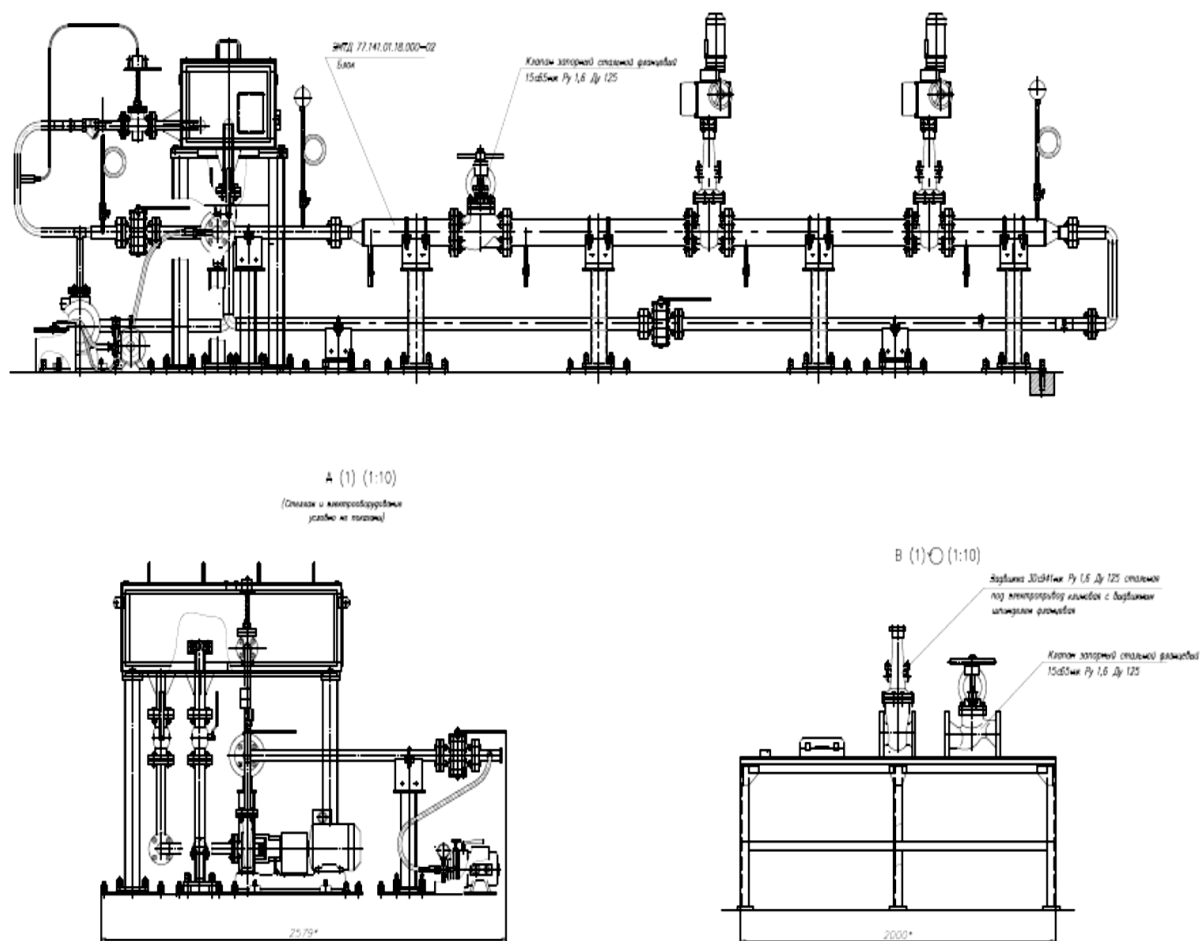


Рисунок 2 – Чертеж экспериментального стенда [Drawing of the test stand]

Спроектированный с учетом изложенных требований экспериментальный стенд позволит проводить обучение методам и приемам технической диагностики, а также ТОиР следующих видов оборудования:

1. Арматура (самодействующая, или импульсная, с ручным, электрическим, или пневматическим приводом):

- запорная (включение и отключение потоков);
- регулирующая (изменение или поддержание заданного расхода, давления);
- предохранительная (предупреждение чрезмерного повышения давления, недопущение изменения направления потока);
- защитная (быстродействующая, обратная) (предупреждение чрезмерного повышения давления, недопущение изменения направления расхода).

2. Насосы:

- объемные, в которых среда перемещается путем периодического изменения объема занимаемой ею камеры, попеременно сообщаемой с входом и выходом насоса;
- динамические, в которых в результате действия сил инерции и вязкости перекачиваемой среды кинетическая энергия от рабочего колеса передается перекачиваемой жидкости, преобразуясь в энергию давления.

3. Трубопроводы и фланцевые соединения.

4. Сальниковые уплотнения.

Выбор приборов для обучения диагностике электроприводного оборудования АЭС

В современных условиях, с учетом курса на замещение импорта товарами, произведенными внутри России, а также с учетом санкций, наложенных на Россию западными странами, оптимальным для оснащения тренажера диагностики электроприводного оборудования АЭС представляется выбор следующих приборов:

- «Крона-517М» для контроля параметров электроприводной арматуры (г. Пенза);
- «ЮНИСКОП», акустико-эмиссионная система (г. Москва).

Технические характеристики прибора Крона-517М приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики Крона-517М [Krona-517M technical specifications]

Параметр	Значение
Регистрация действующих значений силы переменного тока электродвигателя пускового тока в диапазонах*	от 0 до 5 А, от 0 до 100 А, от 0 до 200 А
Регистрация действующих значений силы переменного тока электродвигателя рабочего тока в диапазонах	от 0 до 0,25 А, от 0 до 0,5 А, от 0 до 1 А, от 0 до 5 А, от 0 до 10 А, от 0 до 20 А, от 0 до 40 А
Регистрация напряжения постоянного тока каналами датчиков в диапазоне	от - 10 до + 10 В
Регистрация момента срабатывания конечного, путевого или моментного выключателя с абсолютной погрешностью	не более 20 мс
Приведенная погрешность регистрации напряжения	не более 1 %
Приведенная погрешность регистрации тока	не более 1 %
Регистрация действующих значений переменного напряжения	в диапазоне от 0 до 425 В
Способ регистрации состояния конечных выключателей	дискретный («замкнуто/разомкнуто»)
Вес	не более 15 кг

Технические характеристики прибора ЮНИСКОП, аналогового канала регистрации и характеристики режима течеискания приведены в таблицах 3, 4 и 5.

Таблица 3 – Характеристики базового модуля ЮНИСКОП [Uniscope basic module features]

Параметр	Значение
Дисплей	TFT LED, 5,7" , 640x480 точек, 262 144 цветов
Время работы в автономном режиме	8 часов
Поддерживаемые интерфейсы	Карты памяти SD/SDHC, Ethernet, USB2.0
Процессор	ARM9
Операционная система	Linux
Диапазон рабочих температур	от - 20 °С до + 40 °С
Защита от внешних воздействий	IP 65
Габаритные размеры	300 x 170 x 60 мм
Масса	2,6 кг

Таблица 4 – Характеристики аналогового канала регистрации [Analogue recording channel characteristics]

Параметр	Значение
Количество независимых аналоговых каналов регистрации	2
Напряжение питания предусилителя	6 В
Длина подключаемых кабельных линий	10м / 50м
Диапазон рабочих частот	0,5 Гц ÷ 1 МГц
Переключаемые частотные диапазоны	0,5 Гц ÷ 30 кГц, 1 кГц ÷ 100 кГц, 30 кГц ÷ 1 МГц

Продолжение таблицы 4

Параметр	Значение
Возможность загрузки цифровых фильтров	есть
Разрядность АЦП	16 бит
Максимальная частота преобразования АЦП	20 МГц
Размер буфера записи осциллограммы по каждому каналу	8 МБайт
Синхронность работы аналоговых каналов	± 1 мкс

Таблица 5 – Характеристики режима течеискания [Flow characteristics]

Параметр	Значение
Минимальная величина обнаруживаемой утечки в затворе арматуры	1 л/мин
Необходимый минимальный перепад давления	0,3 МПа
Диапазон значений проходного диаметра контролируемой арматуры	От 50 до 1000 мм
Средняя погрешность измерения величины утечки	20 %
Время контроля единицы арматуры	Менее 15 мин

Предложенный состав диагностических приборов в составе диагностического тренажера может быть существенно изменен и дополнен. Например, для отработки приемов и методов тепловизионного контроля экспериментальный стенд может быть оснащен, с учетом Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности, введенных Приказом Ростехнадзора от 25.03.2014 №116 (ред. от 12.12.2017), нагревательными элементами. Для обучения методам и приемам тепловизионного обследования диагностический тренажер может быть оснащён тепловизорами: ThermoTracer (ТН7716), Flir, Testo (890-2), или отечественными IRAY, RGK. Однако надо учитывать, что обучение методам и приёмам тепловизионного обследования оборудования целесообразно проводить с учетом оборудования, для которого подобный метод наиболее эффективен, прежде всего – электротехнических стоек, кабельного хозяйства, высоковольтных вводов и выключателей. При этом затраты на реализацию и эксплуатацию такого тренажера неизбежно существенно возрастут.

Учебно-методическое обеспечение тренажера диагностики электроприводного оборудования АЭС

Исходя из анализа применяемых на АЭС технологий управления активами [6, 7], а также накопленного опыта диагностики [8, 9, 10] можно сформулировать основные этапы диагностического сопровождения эксплуатации электроприводного оборудования АЭС:

- определение фактического технического состояния электромеханической части электроприводного оборудования при выполнении ею функции «передача движения рабочему органу»;
- составление перечня оборудования, требующего ремонта;
- обоснование видов и категорий ремонта;
- разработка ремонтной документации;
- выполнение ремонта;
- проведение послеремонтного диагностирования;
- ведение диагностических паспортов ЭПА;
- дополнение информационной базы.

Диагностический тренажер позволит отработать на практике каждый из этих этапов, для чего необходимо разработать и оснастить его учебно-методическими материалами (УММ).

УММ предназначены для обучения персонала отдела технической диагностики (ОТД), персонал ремонтных подразделений (ОППР, ЦЦР) и подрядных организаций (АТЭ, АЭР) и независимо от уровня подготовки персонала должны включать:

- теоретические занятия по видам электроприводного оборудования, особенностям их эксплуатации и диагностики;

- теоретические уроки по видам диагностики (в нашем случае – по токовым сигналам и сигналам акустической эмиссии) и применяемым диагностическим приборам;

- теоретические занятия по анализу диагностической информации.

Занятия на диагностическом тренажере (с учетом сформированного состава) позволят получить практические навыки по:

I Диагностике электроприводного оборудования с помощью Крона-517М:

- регистрации токовых сигналов;
- расчету диагностических параметров;
- экспресс-анализу токовых сигналов;
- определению технического состояния;
- анализу сигналов концевых и моментных муфт.

II Акустико-эмиссионному контролю с помощью ЮНИСКОП:

- идентификация свищей, сквозных трещин, протечек в уплотнениях, заглушках, арматуре и фланцевых соединениях;

- обнаружение, определение координат и слежение (мониторинг) за источниками акустической эмиссии, связанными с несплошностями на поверхности или внутри объекта контроля;

- оценка скорости развития дефекта в целях заблаговременного предотвращения отказа или разрушения изделия или своевременного прекращения испытаний.

III Сборке-разборке, ремонту электроприводного оборудования, применению документации:

- разборка/сборка фланцевых соединений;
- разборка/сборка сальниковых уплотнений;
- разборка/сборка трубопроводной арматуры;
- практическое применение ремонтной документации.

Каждое из этих направлений подготовки может быть подготовлено с учетом действующих нормативных документов [11, 12] и пересмотрено на основе перспективных.

Опыт создания и применения диагностического тренажера

Стенд «гидравлическая петля», подобный описанному в данной статье, изготовлен и успешно применяется в учебном процессе на кафедре Атомной энергетики ВИТИ НИЯУ МИФИ (рис. 3).



Рисунок 3 – Стенд «гидравлическая петля» ВИТИ НИЯУ МИФИ
[Hydraulic loop test stand of VETI NRNU MEPhI]

Кроме того, студенты ВИТИ НИЯУ МИФИ также имеют возможность параллельно с изучением теоретических вопросов, связанных с разборкой/сборкой, диагностикой электроприводного оборудования и настройкой концевых выключателей и моментных муфт, предварительно отработать их на виртуальном тренажере.

Виртуальные тренажеры «Сборки-разборки трубопроводной арматуры» и «Настройки блока концевых выключателей электропривода арматуры» были разработаны в 2019-2020 гг. в рамках проекта НИЯУ МИФИ «Совершенствование системы подготовки кадров в университете в соответствии с потребностями цифровой экономики» (рис. 4, 5).



Рисунок 4 – Сборка клапана в виртуальном тренажере [Valve assembly in the virtual simulator]

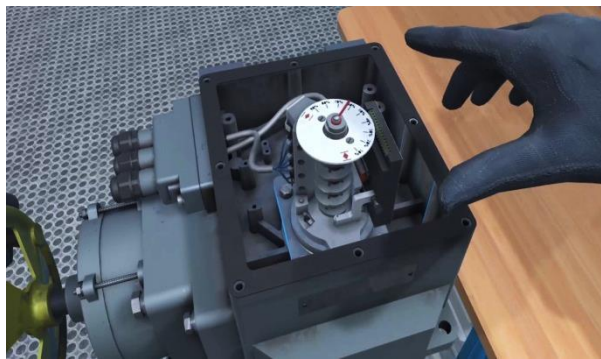


Рисунок 5 – Настройка виртуального блока концевых выключателей [Setting up the virtual limit switch unit]

В 2021 г. на основе отработанных технологий был разработан виртуальный тренажер отработки навыков снятия токовых сигналов на стадии пробных прокруток арматуры в период ППР энергоблока АЭС. Такой виртуальный тренажер позволяет подготовить оператора-диагноста к работам в условиях действующей АЭС с моделированием различных ситуаций, которые могут возникнуть при реальном выполнении работ по диагностике арматуры (рис. 6).



Рисунок 6 – Снятие токовых сигналов в шкафах НКУ, применяемых на АЭС [Current readings in NPP switchgear and controlgear cabinets]

Установка на стенде «гидравлическая петля» моделей электроприводного оборудования, аналогичных применяемым на АЭС, а также дефектных узлов и деталей электроприводного оборудования, позволяет получить диагностическую информацию, идентичную реальным дефектам, встречающимся на АЭС (рис. 7). В качестве диагностической информации используются параметры токового сигнала, снятые на одной или нескольких фазах статорных обмоток электродвигателя привода арматуры, регистрируемые при выполнении операции «открытие/закрытие». На основании

полученных замеров производится расчет определяющих диагностических параметров, выполняется построение огибающих токового сигнала и амплитудно-частотных спектров. Полученные значения и графики сравнивают с нормами оценки, указанными в нормативно-технической документации, соответствующими эталонами, построенными для работоспособной арматуры данного типоразмера и типа привода.

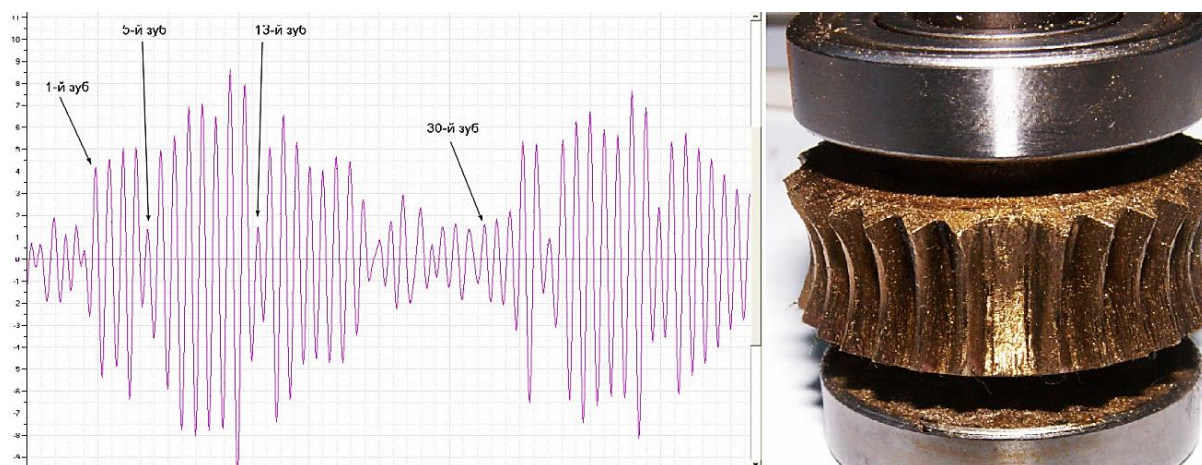


Рисунок 7 – Сигнал дефектного привода (отсутствие зубьев шестерни) [Defective drive signal (missing gear teeth)]

Применение спектрального анализа дает возможность уточнения оценки технического состояния ЭПА. Принятый для анализа метод спектрального диагностирования позволяет обнаружить скрытые дефекты арматуры, не обнаруженные при других видах анализа.

Стенд «гидравлическая петля» позволяет моделировать протечки арматуры и обрабатывать регистрацию и анализ ультразвуковых сигналов, полученных с помощью различных диагностических приборов (рис. 8).

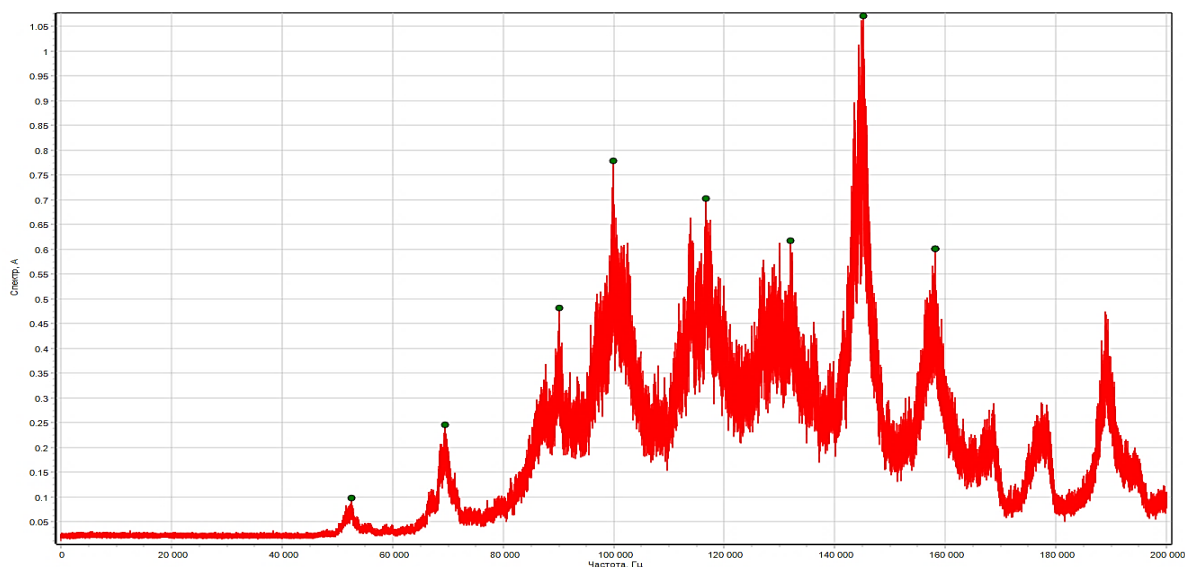


Рисунок 8 – Спектр ультразвукового сигнала задвижки [Ultrasonic signal spectrum of the gate valve]

Возможности стенда «гидравлическая петля» позволяют также проводить перспективные исследования. Например, в настоящее время с применением стенда разрабатывается концепция совмещения испытаний электропривода с оценкой крутящего момента. По результатам исследований аппроксимационная модель ляжет в

основу работы переносного комплекса, совмещающего диагностику электроприводной арматуры и тарировку ограничителей крутящего момента ее привода. Переносной комплекс, обеспечивающий расчетную оценку крутящего момента с приемлемой точностью, может обеспечить снижение затрат при определении дефектов привода и ходового узла электроприводной арматуры за счет проведения её безразборного обследования по месту эксплуатации [13, 14].

Заключение

1. Преимущества практического освоения методов и приемов диагностики, а также ТОиР электроприводного оборудования, диктуют необходимость разработки и создания соответствующего диагностического тренажера. При этом в настоящее время имеется существенный разрыв между теоретической подготовкой персонала диагностических подразделений АЭС и последующей практической отработкой диагностических методов и приемов.

2. На основе анализа опыта работы диагностических подразделений АЭС можно сформировать требования к диагностическому тренажеру, состоящему из экспериментального стенда, диагностических приборов и учебно-методических материалов. При этом экспериментальный стенд позволяет в некотором приближении имитировать условия эксплуатации электроприводного оборудования, а состав диагностических приборов и учебно-методических материалов может изменяться и дополняться.

3. Гибкость в оснащении диагностического тренажера диагностическими приборами, а также программным обеспечением позволит на практике освоить различные методы анализа диагностической информации, применение различных методик, как действующих, так и перспективных.

4. С практическими занятиями на диагностическом тренажере может быть совмещено обучение работе с эксплуатационной и ремонтной документацией, разборке/сборке оборудования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. СТО 1.1.1.01.004.0680-2006: Положение о порядке комплектования и опережающей подготовки персонала для атомных станций СТЭО 0644-2005 // ОАО «Концерн Росэнергоатом»/ – 2006. – С. 12- 19.
2. ГОСТ 20911-89 Техническая диагностика. Термины и определения. – С. 2-5.
3. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности опасных производственных объектов, на которых используется оборудование, работающее под избыточным давлением». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/499086260> (дата обращения: 25.05.2022)
4. СНиП 3.05.05-84. Строительные нормы и правила. Технологическое оборудование и технологические трубопроводы (утв. Постановлением Госстроя СССР от 07.05.1984 N 72). – URL: <https://docs.cntd.ru/document/5200025> (дата обращения: 25.05.2022)
5. СНиП 3.05.06–85. Свод правил. Электротехнические устройства. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456050591> (дата обращения: 25.05.2022)
6. СТО 1.1.1.01.002.0069-2019 Организация технического обслуживания и ремонта систем и оборудования атомных станций. – С. 27-57.
7. НП-096-15 Требования к управлению ресурсом оборудования и трубопроводов атомных станций. Основные положения. – URL: <http://cntr-nrs.gosnadzor.ru/about/AKTS/%D0%9D%D0%9F-096-15.pdf> (дата обращения: 25.05.2022)
8. Слепов, М.Т. Диагностика ЭПА – опыт работы Нововоронежской АЭС / М.Т. Слепов, Н.П. Сысоев // Глобальная ядерная безопасность. – 2014. – № 2. – С. 79-85.
9. Слепов, М.Т. и др. Технологии анализа диагностических параметров электроприводной арматуры на действующих энергоблоках Нововоронежской АЭС / М.Т. Слепов, Е.А. Абидова, В.Н. Никифоров, О.Ю. Пугачева // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2014. – № 4. – С. 16-22.
10. Пугачева, О.Ю. Цели и задачи организации диагностического мониторинга оборудования АЭС / О.Ю. Пугачева, В.Н. Никифоров, Е.А. Абидова, П.В. Синельщиков, Р.Г. Бабенко, Ю.Н. Елжов // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – № 3(16). – С. 70-76.

11. МТ 1.2.3.02.999.0085-2010 Методика «Диагностирование трубопроводной электроприводной арматуры». Открытое акционерное общество. «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях» (ОАО «Концерн Росэнергоатом»). – С. 7-62.
12. МУ 1.3.3.99.0026-2010. Системный подход к обучению персонала атомных станций. Методические указания по применению. С Изменением №1, приказ АО «Концерн Росэнергоатом», от 08.11.2016 № 9/1423-П.
13. Подрезова, И.С. Анализ причин заклинивания и обрывов штоков трубопроводной электроприводной арматуры / И.С. Подрезова, Л.В. Шутова, Ю.Е. Ульянова, О.Ю. Пугачева, Ю.Н. Елзов // Глобальная ядерная безопасность. – 2014. – № 4(13). – С. 32-37.
14. Синельщиков, П.В. Расчет крутящего момента электроприводной арматуры по сигналам тока и напряжения / П.В. Синельщиков, Р.Г. Бабенко // Глобальная ядерная безопасность. – 2014. – № 4(13). – С. 28-31.

REFERENCES

- [1] STO 1.1.1.01.004.0680-2006: Polozhenie o poryadke komplektovaniya i operezhayushchej podgotovki personala dlya atomnyh stancij STEO 0644-2005 [Rosenergoatom Concern OJSC – 2006. Regulations on the Procedure of Personnel Recruitment and Advanced Training for Nuclear Power Plants STEO 0644-2008. P. 12-19 (in Russian).
- [2] GOST 20911-89 Tekhnicheskaya diagnostika. Terminy i opredeleniya [State Standard 20911-89 Technical Diagnostics. Terms and definitions]. P. 2-5 (in Russian)/
- [3] Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoj bezopasnosti «Pravila promyshlennoj bezopasnosti opasnyh proizvodstvennyh ob"ektov, na kotoryh ispol'zuetsya oborudovanie, rabotayushchee pod izbytochnym davleniem» [Federal Norms and Rules in the Field of Industrial Safety "Rules of Industrial Safety of Hazardous Production Facilities where Equipment Operating under Overpressure is Used] URL: <https://docs.cntd.ru/document/499086260> (accessed: 05/25/2022) (in Russian).
- [4] SNiP 3.05.05-84. Stroitel'nye normy i pravila. Tekhnologicheskoe oborudovanie i tekhnologicheskie truboprovody (utv. Postanovleniem Gosstroya SSSR ot 07.05.1984 N 72) [SNiP 3.05.05-84. Construction Norms and Rules. Technological Equipment and Technological Pipelines (approved by Gosstroy of the USSR, 07.05.1984 N 72)]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/5200025> (accessed: 05/25/2022) (in Russian).
- [5] SNiP 3.05.06-85. Stroitel'nye normy i pravila. [A Set of Rules. Electrical Devices]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456050591> (accessed: 05/25/2022) (in Russian)
- [6] STO 1.1.1.01.002.0069-2019 Pravila organizacii tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta sistem i oborudovaniya atomnyh stancij [STO 1.1.1.01.002.0069-2019 Rules Organization of Maintenance and Repair of Systems and Equipment of Nuclear Power Plants]. P. 27-57 (in Russian).
- [7] NP-096-15 Trebovaniya k upravleniyu resursom oborudovaniya i truboprovodov atomnyh stancij. Osnovnye polozheniya [NP-096-15 Requirements for Lifetime Management of Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants. Main provisions.]. URL: <http://cntr-nrs.gosnadzor.ru/about/AKTS/%D0%9D%D0%9F-096-15.pdf> (accessed: 05/25/2022) (in Russian).
- [8] Slepov M.T., Sysoev N.P. Diagnostika EPA – opyt raboty Novovoronezhskoj AES [EPA Diagnostics as Experience of Novovoronezh NPP]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2014. №2 (in Russian).
- [9] Slepov M.T., Abidova E.A., Nikiforov V.N., Pugacheva O.Yu. Tekhnologii analiza diagnosticheskikh parametrov elektroprivodnoj armatury na deystvuyushchih energobloках Novovoronezhskoj AES. [Technologies of Analysis of Diagnostic Parameters of Electric Actuator Valves at Operating Power Units of Novovoronezh NPP // Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya [Electrical Complexes and Control Systems]. 2014. №4. P. 16-22 (in Russian).
- [10] Pugacheva O.Yu., Nikiforov V.N., Abidova E.A., Sinelshchikov P.V., Babenko R.G., Yelzhov Yu.N. Celi i zadachi organizacii diagnosticheskogo monitoringa oborudovaniya AES [Aims and Objectives of the Organisation of Diagnostic Monitoring of NPP Equipment]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2015. №3(16). P. 70-76 (in Russian).
- [11] МТ 1.2.3.02.999.0085-2010 Методика «Диагностирование трубопроводной электроприводной арматуры» [MT 1.2.3.02.999.0085-2010 Methodology «Diagnostics of Electrically Operated Pipeline Valves»] Открытое акционерное общество. «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях» (ОАО «Концерн Росэнергоатом») [Open

- Joint-Stock Company. «Russian Concern for Production of Electric and Thermal Energy at Nuclear Power Plants» (JSC «Concern Rosenergoatom»)] (in Russian).
- [12] MU 1.3.3.99.0026-2010. Sistemnyj podhod k obucheniyu personala atomnyh stancij. Metodicheskie ukazaniya po primeneniyu. S Izmeneniyem №1, prikaz AO «Koncern Rosenergoatom», ot 08.11.2016 № 9/1423-P. x MU 1.3.3.99.0026-2010. [System Approach to Training of Personnel of Nuclear Power Plants. Methodical instructions for application. With Amendment No.1, Order of JSC "Concern Rosenergoatom", 08.11.2016 No. 9/1423-P.] (in Russian).
- [13] Podrezova I.S. Analiz prichin zaklinivaniya i obryvov shtokov truboprovodnoj elektroprivodnoj armatury [Analysis of Causes of Jamming and Rod Breakage in Electrically Operated Pipeline Valves]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2014. №4(13). P. 32-37 (in Russian).
- [14] Sinel'shchikov P.V., Babenko R.G. Raschet krutyashchego momenta elektroprivodnoj armatury po signalam toka i napryazheniya [Calculation of Actuator Torque from Current and Voltage Signals]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2014. № 4(13). P. 28-31 (in Russian).

Prospects of Creating a Full-Scale Diagnostic Simulator for NPP Electric Drive Equipment

Aleksandr A. Lapkis¹, Maksim V. Kalashnikov², Igor' A. Mikshin³

^{1,2,3}*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

¹*AALapkis@mephi.ru, ORCID iD: 0000-0002-9431-7046*

²*ya.mkalashnikov@ya.ru*

³*mikshin89@mail.ru*

Abstract. The paper describes perspectives of development and manufacturing of full-scale simulator for training in methods of diagnostics of electric drive equipment used at NPPs. An approximate composition of technical means included in the simulator is given and its technical characteristics are substantiated. The training simulator of diagnostics must include an experimental stand which allows to simulate real operating conditions as well as possible defects of electric drive equipment of NPP, and also an instrumentation park and methodological support used at NPP for diagnostics. Implementation of training in methods and techniques of technical diagnostics with their practical development on the diagnostics simulator will increase the quality of diagnostic support of NPP electric drive equipment operation.

Keywords: simulator, diagnostics, electric drive equipment, valves, pump, electric drive, defect, hydraulic loop, repairs, maintenance.

For citation: Lapkis A.A., Kalashnikov M.V., Mikshin I.A. Prospects of Creating a Full-Scale Diagnostic Simulator for NPP Electric Drive Equipment // Global nuclear safety. 2022. Vol. 3(44). P. 30-42. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-03-03>

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.564.2:534.2
doi: 10.26583/gns-2022-03-04

**КЛАСТЕРИЗАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В ГЛАВНОМ
ЦИРКУЛЯЦИОННОМ КОНТУРЕ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ С
ВВЭР-1000/1200, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ШТАТНЫМИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОПЕРАЦИЯМИ**

© 2022 Аркадов Геннадий Викторович¹, Трыкова Ирина Владимировна²,
Коцоев Константин Игоревич³

^{1,2,3} Акционерное общество «Научно-технический центр «Дианпром», Обнинск, Калужская обл., Россия

³ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

¹ skrepka1964@gmail.com

² trykova@kvantprogramm.ru

³ kotsoev@kvantprogramm.ru

Анотация. В реакторных установках с водо-водяным энергетическим реактором не исключено появление в главном циркуляционном контуре свободных, слабозакрепленных и посторонних предметов. Эти предметы, перемещаясь в потоке теплоносителя, могут соударяться со внутренними стенками главного циркуляционного контура, что может привести к повреждению оборудования. Раннее обнаружение этих предметов позволит минимизировать повреждения и повысить уровень безопасности эксплуатации АЭС. С этой целью реакторная установка оснащается системой обнаружения свободных/слабозакрепленных предметов (СОСП). Основной проблемой СОСП является большое количество ложных тревог, возникающих вследствие регистрации шумов от штатного функционирования АЭС. В работе рассматривается применение алгоритмов кластеризации к сигналам СОСП, что позволяет значительно уменьшить число ложных тревог, поскольку установлено, что сигналы от срабатывания штатного оборудования отличаются большей степенью повторяемости. Тогда, «обучив» СОСП на некотором архиве данных, характеризующих штатное функционирование РУ, мы можем утверждать, что, если вновь поступивший сигнал попадает в один из кластеров, то он отражает штатное функционирование РУ, в то время как сигналы, не попавшие ни в один из кластеров, могут быть следствием появления свободного/слабозакрепленного предмета и данная ситуация требует незамедлительного реагирования персонала, эксплуатирующего АЭС. Данный подход позволяет значительно уменьшить количество выходной информации СОСП, снизить нагрузку на эксплуатирующий персонал, улучшить качество принимаемых решений и, соответственно, увеличить безопасность эксплуатации РУ в целом.

Ключевые слова: атомная электростанция, реакторная установка, акустические сигналы, кластеризация, большие данные, свободные и слабозакрепленные предметы, повреждение оборудования, безопасность эксплуатации, акустические аномалии, раннее обнаружение.

Для цитирования: Аркадов Г.В., Трыкова И.В., Коцоев К.И. Кластеризация акустических событий в главном циркуляционном контуре реакторной установки с ВВЭР 1000/1200, обусловленных штатными технологическими операциями // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 3(44). – С. 43-55. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-03-04>

Поступила в редакцию 30.05.2022

После доработки 29.07.2022

Принята к публикации 12.08.2022

Введение

Система обнаружения свободных и слабозакрепленных предметов (СОСП) является средством автоматического обнаружения аномальных акустических событий, регистрируемых акселерометрами, смонтированными на главном циркуляционном контуре реакторной установки (РУ) [1-2]. Основной целью СОСП является обнаружение на ранней стадии свободных и слабозакрепленных предметов в первом контуре. Эксплуатация системы на АЭС показала, что наряду со свободными и слабозакрепленными предметами, всплески акустического шума могут быть вызваны:

1) теплогидравлическими процессами (в том числе гидравлическими ударами, кавитацией, кипением теплоносителя (ТН), детонацией гремучей смеси);

2) штатными технологическими операциями или изменением состояния/режима работы агрегата какой-либо системы энергоблока (включая процедуры опробования и испытания оборудования);

3) вибрациями оборудования и трубопроводов главного циркуляционного контура (ГЦК).

Акустические эффекты также проявляются при тепловом перемещении оборудования в режимах разогрева/расхолаживания. Здесь возможны соударения элементов конструкции (в узлах крепления внутрикорпусных устройств, тепловыделяющих сборок (ТВС)), проявление эффекта «страгивания» подвижных опор парогенераторов (ПГ) и главных циркуляционных насосов (ГЦН) из состояния покоя. События, вызванные этими причинами, могут быть отнесены к ложным тревогам. Однако идентифицировать событие, вызванное технологическими причинами не всегда просто из-за сложности контролируемого оборудования, сложности систем, обеспечивающих его функционирование, сложности алгоритмов (технологии) их работы.

Технологические операции имеют, как правило, воспроизводимый «акустический портрет». Причем воспроизводятся не только диагностические признаки, но и собственно сигналы (вплоть до «поточечного» совпадения сигнала как функции времени). Например, срабатывание определенной арматуры дает один и тот же переходный процесс (акустическую аномалию). То есть, этот процесс можно отнести к детерминированным процессам.

Соударение свободного предмета всегда характеризуется наличием случайного (стохастического) компонента в сигнале датчика. Выявление стохастического и детерминированных компонентов сигнала возможно только статистическим путем. Регистрация кратных событий (последовательных во времени событий со схожими характеристиками), вероятнее всего, обусловлена технологическими причинами.

Таким образом, если классифицировать кратные события, которые имеют технологическую природу, количество ложных срабатываний СОСП значительно уменьшится.

Подходы к кластеризации событий

В идеализированном случае процесс классификации должен основываться на априорном знании источника акустической аномалии. В тестовом случае удар задается пользователем СОСП и, после его обнаружения и регистрации, оцениваются признаковые параметры (номер базового канала (БК), разность времен прихода, максимум среднеквадратичного значения, крутизна переднего фронта), которые объявляются образом (эталоном) данного класса. По возможности, перебираются последовательно все источники акустических эффектов. К таковым источникам, прежде всего, относится запорно-регулирующая арматура. Помимо такой тестовой классификации событий возможен и функциональный подход, когда в процессе нормального функционирования объекта, после того как зарегистрирован акустический

эффект, выявляется его источник (некоторое штатное управление объектом). Тестовую классификацию можно осуществить в режиме обязательного ежегодного опробования арматур систем безопасности. Она осуществляется в режиме «горячего» останова по утвержденной программе. Срабатывания арматур систем безопасности генерирует, как правило, мощные акустические сигналы. Однако потом, в режиме нормальной эксплуатации, данные события не воспроизводятся и практический эффект по снижению числа ложных тревог становится нулевым.

Функциональную классификацию, по возможности, необходимо проводить всегда, в течение всего срока эксплуатации СОСП. Она состоит в установлении «задним числом» истинного источника зарегистрированного удара. Именно по такому принципу российские и зарубежные разработчики СОСП предполагают обучение системы. Для этого целесообразно искать совпадения во времени некоторого дискретного штатного сигнала управления со временем обнаружения акустического события СОСП. К сожалению, эта простая идея не реализуется в силу технических проблем обмена информацией между различными системами автоматизированной системы управления технологических процессов (АСУ ТП).

Нисколько не отвергая тестовый и функциональный подходы к классификации, в данной работе реализован статистический подход. Огромное число зарегистрированных в базе данных СОСП ударов позволяет применить в известном смысле формальные методы – алгоритмы кластеризации.

Прежде всего, здесь дается ответ на вопрос: «Наблюдалось ли в точности такое же событие ранее?» Если ответ «да», то зарегистрированное событие – ложная тревога, т.к. основное предназначение СОСП – обнаружение свободных предметов. Они, как известно, обладают большим стохастическим компонентом.

В статистическом подходе, как правило, формализуются большое число классов. Не каждый полученный класс может быть физически обоснован. Например, нарушается принцип «одна арматура – один класс».

При дальнейшей эксплуатации и накоплении информации, классы могут укрупняться. При статистическом подходе достигается практический результат, состоящий в том, что уменьшается угроза «обнаружения» свободного предмета в тех случаях, когда такового предмета в действительности нет, т.е. уменьшается вероятность ложной тревоги при диагностировании (ошибки первого рода).

Обзор методов классификации и кластеризации, методы оценки качества разбиения данных приведены в [3].

Огромный опыт по применению кластерного анализа к описанию состояний оборудования АЭС приведен в [4]. Там же показана важность выбора информативных признаков для кластеризации, приведены методы визуализации кластеров, произведено сопоставление каждого кластера к определенному штатному режиму работы оборудования либо к неисправности (аномалии).

Исходные данные

В РУ ВВЭР-1000/1200 существуют пять объемов ГЦК, конструктивно локализирующих свободные предметы:

- верхняя часть объема горячего коллектора ПГ (4 шт.);
- нижний объем между шахтой внутрикорпусных устройств и корпусом реактора.

Датчики СОСП располагаются вблизи мест естественных ловушек свободных предметов (рис. 1) при циркуляции ТН как при прямом (днище реактора, горячий коллектор ПГ), так и при обратном токе ТН (холодный коллектор ПГ).

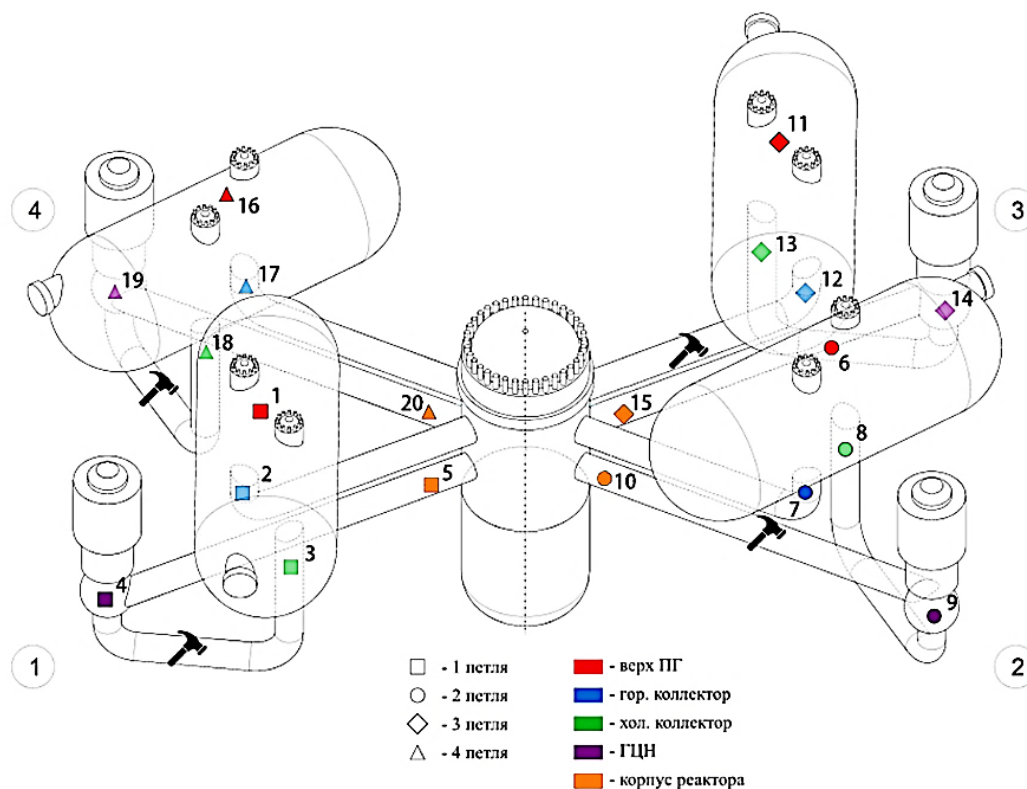


Рисунок 2 – Типовая схема расположения датчиков каналов обнаружения СОСП [Typical layout of detection channel sensors of Free and Loose Object Detection System]

В качестве исследуемого множества событий были взяты измерения, накопленные за 2021 г., одной из действующих СОСП РУ с ВВЭР-1200. Всего рассматривается порядка 11400 событий. Каждое событие переводится в признаковое пространство X . «Событие», регистрируемое СОСП, представляет собой запись сигналов со всех акустических датчиков одновременно, т.е. одно событие – это массив из 20 временных реализаций.

Временная реализация сигналов событий – это запись входного процесса, представляющая собой последовательность оцифрованных значений. Частота дискретизации при записи временных реализаций СОСП постоянна и равна 50 кГц. Длительность временных реализаций составляет 60 мс., что соответствует 3000 точек, и складывается из 20 мс. до превышения момента регистрации события – обнаружения факта превышения порога по первому каналу и 40 мс. после регистрации превышения.

Ключевым признаком события является номер базового канала (БК) – номер канала датчика, который первым зарегистрировал прохождение фронта волны от удара. Номер БК характеризует локализацию источника и максимум среднеквадратичного значения (СКЗ), характеризующего энергию акустического сигнала.

При этом СКЗ j -го сигнала события определяется по формуле (1):

$$r_{nj} = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=n}^{n+k} s_{ij}^2}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, 2900 \quad (1)$$

где k – окно усреднения для вычисления СКЗ (стандартно 100 точек, или 2 мс.);

s_{ij} – значение j -го сигнала в точке i .

Получаем временные реализации СКЗ сигнала длиной 2900 точек (из начальной длины реализации вычитается длина буфера), или 58 мс.

По СКЗ j -го сигнала определяется его «мощность» M_j : максимальное СКЗ акустического сигнала с поправкой на среднее значение СКЗ на участке фонового измерения (2):

$$M_j = \max_n(r_{nj}) - \frac{1}{N_f} \sum_{n=1}^{N_f} r_{nj}, \quad (2)$$

где N_f – длина участка фона.

Обозначим $M_{ij}^{\max}$ – мощность j -го ($j=1,2,\dots,20$) сигнала i -го ($i=1,2,\dots,N$) события в выборке. Помимо значений мощности, в качестве признаков будем использовать нормированные значения той же самой мощности на максимальную, но внутри одного события (3):

$$M_{ij}^{\text{rel}} = \frac{M_{ij}}{\max_j(M_{ij})}. \quad (3)$$

Исторически сложилось, что диагностическими (классификационными) признаками регистрируемых СОСП сигналов событий являются (для фиксированного БК), рисунок 2:

- номера каналов трех следующих по времени прихода переднего фронта волны датчиков;
- время прихода переднего фронта БК;
- разность времен прихода переднего фронта между базовым датчиком и тремя другими;
- мощность сигналов первых четырех сигналов по времени прихода переднего фронта;
- нормированные значения мощности первых четырех сигналов;
- крутизна переднего фронта первых четырех сигналов.

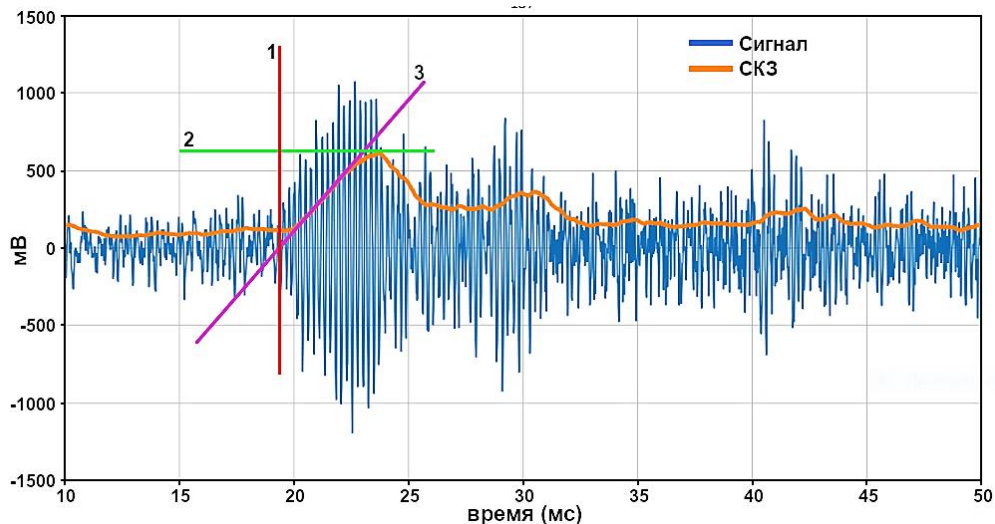


Рисунок 3 – Пример определения диагностических признаков: 1 – время прихода переднего фронта; 2 – максимум СКЗ; 3 – крутизна переднего фронта [Example of defining diagnostic features: 1 - leading edge arrival time; 2 - maximum RMS voltage; 3 - leading edge steepness]

Данное 19-мерное признаковое описание рассчитывается на основании временных реализаций сигналов всех 20 каналов, по 10 параметрам определения времени прихода. Подбор параметров определения времени прихода осуществляется экспертом, неаккуратно выставленные параметры влияют на очередность каналов по

времени прихода переднего фронта сигналов, что, в свою очередь, может исказить локализацию акустической аномалии.

Будучи разными по физическому смыслу, диагностические признаки сильно различаются между собой по абсолютным величинам. Дисбаланс между значениями признаков может вызвать неустойчивость работы алгоритмов кластеризации и ухудшить результаты обучения.

Для того чтобы нивелировать данные различия, предлагается вместо абсолютных значений этих признаков использовать их логарифмические значения и нормализацию. Для нормализации используем метод Мин-Макс [5]. Данный метод переводит измеренные значения в значения между 0.0 и 1.0. Нормированное значение признака X определяется как (4):

$$X_n = \frac{\lg X - \min(\lg X)}{\max(\lg X) - \min(\lg X)} . \quad (4)$$

Распределение событий по базовым каналам приведено на рисунке 3.

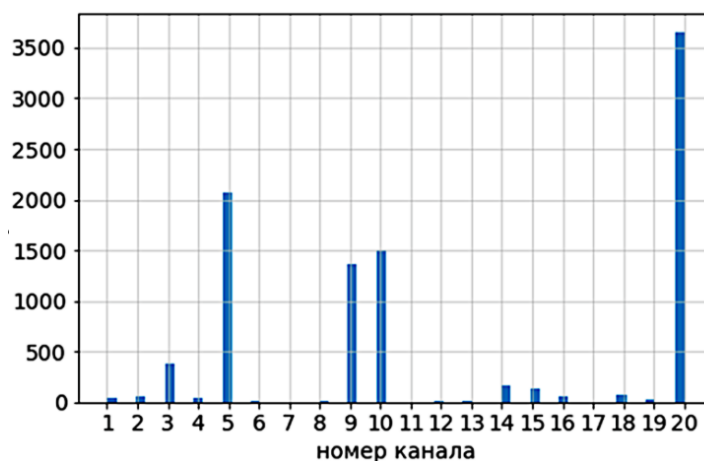


Рисунок 4 – Распределение событий по базовым каналам [Distribution of events to base channels]

Кластеризация K-means

Для кластеризации событий воспользуемся методом *Mini Batch K-means*, который был предложен в [5] как альтернативный алгоритм кластеризации для больших объемов данных. Преимуществом данного метода является снижение вычислительных затрат путем использования подвыборок меньшего фиксированного размера вместо всего набора исходных данных.

Метод основан на следующих интуитивных предположениях об оптимальных кластерах:

- «центром кластера» является арифметическое среднее всех точек кластера;
- каждая точка расположена ближе к центру своего кластера, чем к центрам соседних.

В данном методе решается задача минимизации целевой функции (5):

$$\min \sum_{x \in X} \|f(C, x) - x\|^2, \quad (5)$$

где C – матрица центров кластеров,

$f(C, x)$ – функция, возвращающая ближайший центр кластера ($c \in C$) к x на основании Евклидова расстояния.

Для оптимизации применяется метод стохастического градиентного спуска по подвыборке, которая имеет, как правило, меньший уровень шума, т.е. улучшается сходимость метода.

Первоначальная инициализация центров кластеров совершается по алгоритму *k-means++* [6]. Существенным недостатком метода *K-means* является то, что количество кластеров должно быть задано заранее.

Для кластеризации были отобраны сигналы по базовому каналу №5 (2073 шт.), которые были разбиты на 400 обобщенных кластеров, характеризующих мощность и характер акустического процесса. Результаты кластеризации приведены на рисунке 4.

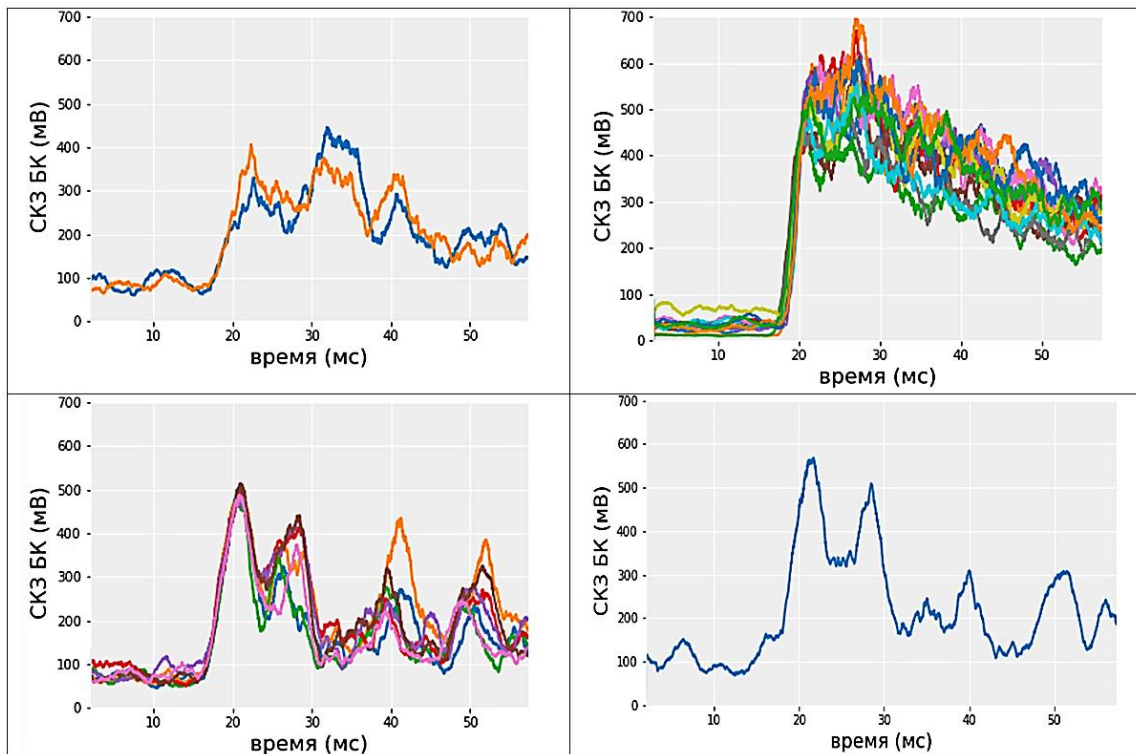


Рисунок 5 – Примеры кластеров, полученных при помощи алгоритма K-means, для БК №5 [Examples of clusters obtained using the K-means algorithm, for BC№5]

Кластеры, содержащие только один сигнал, могут быть порождены сигналами от свободных/слабозакрепленных предметов.

Недостатком данного подхода является то, что количество кластеров задается вручную и нет очевидной меры качества кластеров. Поэтому невозможно определить само качество кластеризации и процент некластеризованных событий.

Кластеризация DBSCAN

Так как количество классов априори неизвестно, то для кластеризации событий используем плотностной алгоритм *DBSCAN* (Density-based spatial clustering of applications with noise) [7], который не требует их задания при инициализации.

DBSCAN алгоритм рассматривает кластеры как области с высокой плотностью, разделенные областями с низкой плотностью. В связи с этим, с общей точки зрения, кластеры, найденные по *DBSCAN*, могут быть любой формы, в отличие от К-средних, которые предполагают кластеры выпуклой формы. Алгоритм вычисляет расстояния между соседними элементами и на основании этих расстояний выделяет кластеры.

Имея соответствующее описание события в численном признаковом пространстве, в качестве меры близости двух событий можно использовать Евклидово расстояние – геометрическое расстояние между событиями в $\mathbb{R}^{19}$ пространстве признаков (6):

$$d(x_i, x_j) = \|x_i - x_j\|_2 = \sqrt{\sum_{n=1}^{19} |x_{i_n} - x_{j_n}|^2} \quad (6)$$

Центральным компонентом в *DBSCAN* является понятие корневых элементов, которые находятся в областях с высокой плотностью. Кластером является набор корневых объектов, которые расположены близко друг к другу (используя меру близости) и набор граничных объектов, которые близки к корневым, но сами не являются корневыми. Все события, которые не являются ни корневыми, ни граничными относятся к «шумовым», которые не принадлежат ни одному кластеру.

При инициализации алгоритма задаются два параметра: *MinPts* и ϵ . Данные параметры непосредственно определяют меру плотности и влияют на результат кластеризации. Формально, корневой объект e_i определяется как объект в ϵ -окрестности которого находится как минимум *MinPts* объектов, т.е. (7):

$$N_\epsilon(x_i) = \{x_j \in E \mid d(x_i, x_j) \leq \epsilon\} \geq \text{MinPts} . \quad (7)$$

Кластер представляет собой набор элементов, которые могут быть найдены рекурсивно, принимая образец корневого элемента, далее находятся все плотно-достижимые соседи, которые определяются как корневые объекты, находятся все их соседи, и так далее. Кластер также имеет набор граничных объектов, которые являются соседними для корневого объекта, но сами не являются корневыми. Интуитивно эти объекты находятся на периферии кластера. Процесс завершается, когда ни к одному кластеру не может быть добавлено ни одного нового объекта.

Выбор параметров *MinPts* и ϵ основывается на специфике исходных данных [8]. Технологические операции, такие как срабатывания арматуры, отвечающие за безопасность, довольно редкие явления. Поэтому минимальное количество событий в одном кластере (*MinPts*) принимается равным двум. Данное количество минимального числа событий в кластере позволит кластеризовать как редкие, так и часто происходящие события, не оказав существенного влияния на качество кластеризации. Стоит отметить, что такие низкие значения *MinPts* в значительной степени увеличивают количество кластеров. Идея выбора оптимального значения ϵ заключается в нахождении «перегиба» на графике расстояний между двумя соседними событиями, упорядоченному по возрастанию. Из рисунка 5 видно, что оптимальное значение ϵ лежит в районе 0,2.

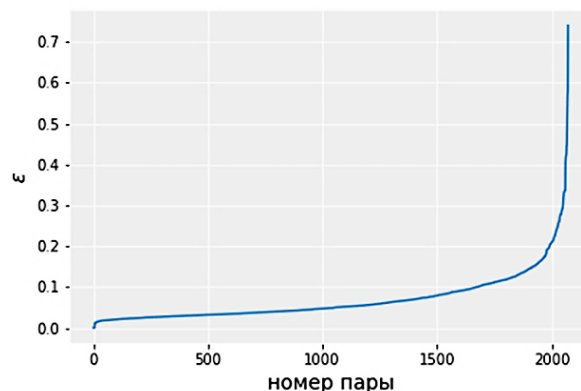


Рисунок 5 – Упорядоченное межпарное расстояние обучающей выборки кластеризации DBSCAN
[Ordered inter-pair distance of the DBSCAN clustering training sample]

В результате кластеризации для 2073 событий по БК №5 методом *DBSCAN* получается 57 кластеров (пример СКЗ сигналов разных кластеров показан на рисунке 6), которые покрывают ~ 81% всех зарегистрированных событий.

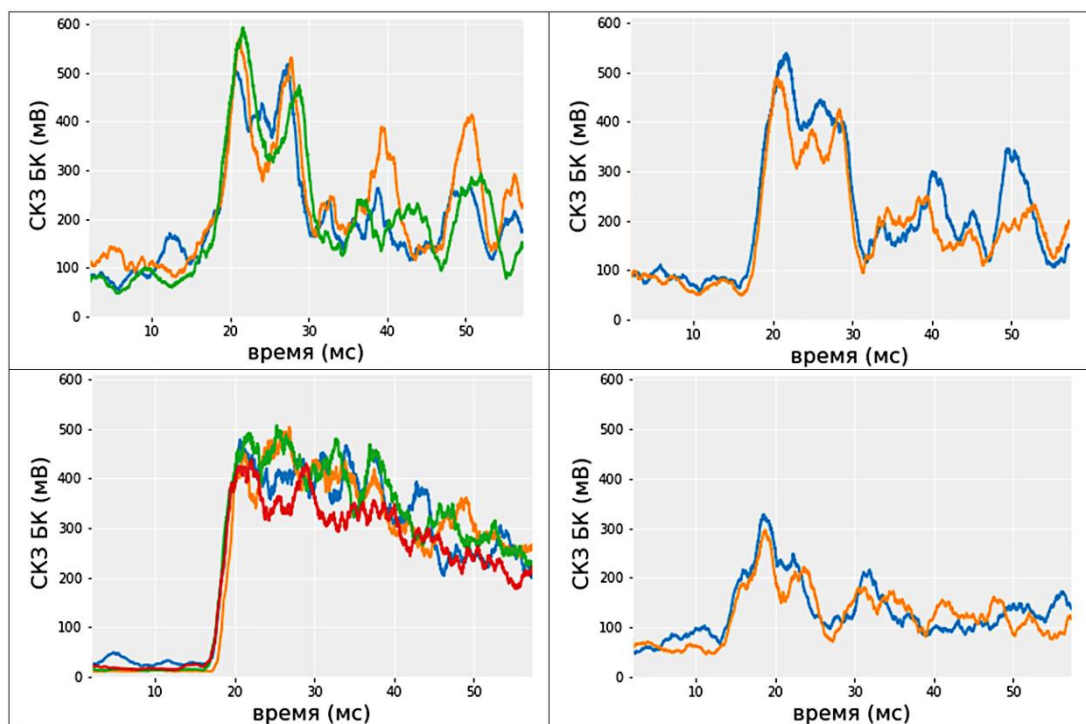


Рисунок 6 – Примеры кластеров DBSCAN по БК №5 [Examples of DBSCAN clusters by BC№5]

Иерархическая кластеризация

Иерархическая кластеризация [9-10] – совокупность алгоритмов упорядочивания данных, направленных на создание иерархии (дерева) вложенных кластеров. Дерево строится от листьев к корню. В начальный момент времени каждый объект содержится в собственном кластере. Далее происходит итеративный процесс слияния двух ближайших кластеров до тех пор, пока все кластеры не объединятся в один или не будет найдено необходимое число кластеров. Эффективность алгоритмов иерархической кластеризации в применении к идентификации режимов теплообмена была исследована в работе [4]. Подход, использующий для кластеризации участки временных рядов, разработан в [11].

Как уже отмечалось выше, штатные технологические операции имеют воспроизводимый «акустический портрет». Поэтому, воспользуемся похожестью формы сигнала, начиная от времени, когда сигнал был зарегистрирован и до некоторого момента, когда он начинает спадать. Для анализа берем 200 точек СКЗ сигнала по базовому каналу, откорректированного на уровень фона (см. формулу 2), начиная от времени прихода переднего фронта. Особенностью данного подхода является то, что нормализация Мин-Макс не производится.

На каждом шаге вычисляется расстояние между кластерами и пересчитывается расстояние между новыми кластерами. Расстояние между кластерами X и Y определяется через расстояние между объектами по методу «полной связи» (англ. *complete linkage*) [12] (8):

$$R(X,Y) = \max_{x \in X, y \in Y} \|x - y\|_2 = \max_{x \in X, y \in Y} \sqrt{\sum_{n=1}^{200} |x_n - y_n|^2} \quad (8)$$

Метод требует настройки длины фрагмента сигнала и порога метрики, отвечающей за принадлежность к кластеру.

Результат кластеризации для 1473 событий по БК №9 методом иерархической кластеризации показан на рисунке 7, получается 197 кластеров.

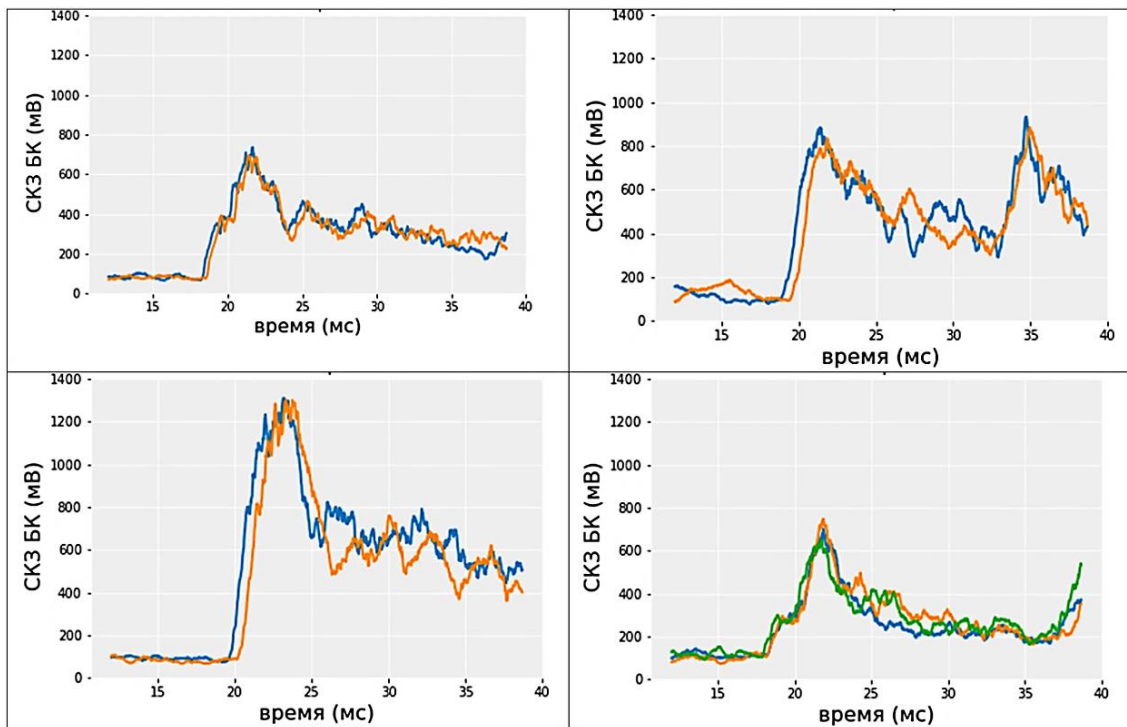


Рисунок 7 – Результаты иерархической кластеризации по БК №9 [Hierarchical clustering results for BC№9]

Выводы

В статье обобщен опыт применения кластерного анализа к данным, регистрируемым СОСП. Приведен метод выделения характерных признаков сигналов, необходимых для кластеризации событий. Вновь регистрируемые события проходят процедуру классификации, т.е. причисление события к ранее созданному классу (кластеру) по совпадению рассчитанных параметров сигналов. Данная процедура в значительной степени уменьшает количество ложных срабатываний СОСП.

Некластеризованные события относятся к «шумовым». Они связаны как со свободными или слабозакрепленными предметами, так и обусловлены ложными регистрациями СОСП, вызванными нестационарностью фонового шума, временной неисправностью некоторых каналов, заменой блоков предусилителей, влияющих на абсолютные значения сигналов и другими причинами.

Полученные кластеры не несут в себе информацию об источнике акустической аномалии, а только подтверждают факт ее повторения. Поэтому там, где это возможно, необходимо проведение дальнейшей обработки событий – уточнение причин их возникновения (перевод безымянных кластеров в область точных классов). Т.е. каждому кластеру должна быть поставлена в соответствие та технологическая операция, работой или изменением режима работы которой вызваны события этого кластера.

В данном случае решается обратная задача – установления связи «акустическая реакция – воздействие», которая производится по штатным сигналам АСУ ТП. Срабатывания арматуры приводит к воспроизводимым акустическим реакциям с большой степенью детерминированности [2]. Временные метки дискретных сигналов АСУ ТП, связанных с работой технологического оборудования, сопоставляются со временем регистрации акустической аномалии. Данная алгоритмическая процедура осложняется большим количеством регистрируемых технологических параметров и особенностями хранения исторической информации – разреживанием сигналов в системе верхнего блочного уровня (СВБУ – подсистема АСУ ТП). Однако, проведя процедуру предварительной кластеризации, достаточно определить источник только одного события из данного кластера. Так, например, на рисунке 8 показаны сигналы

событий двух кластеров, вызванных движением органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ).

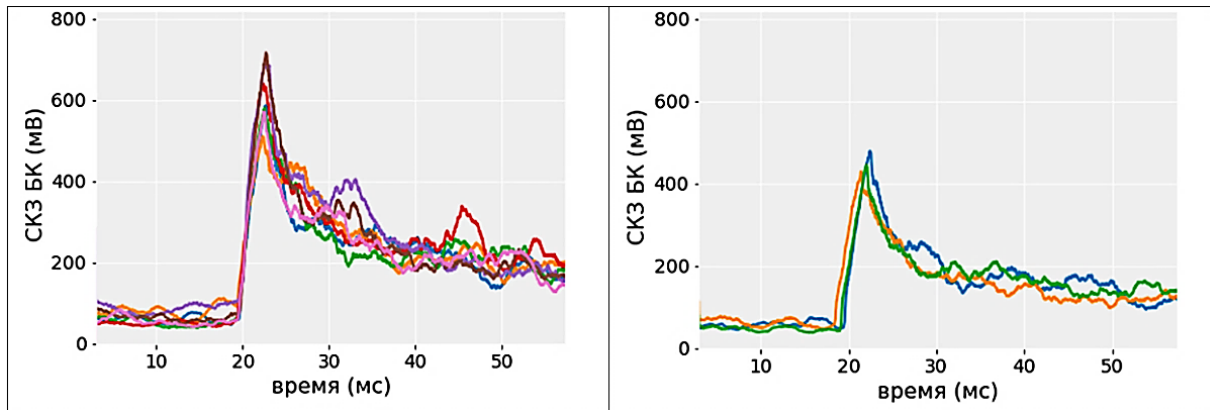


Рисунок 8 – Кластеры сигналов событий, вызванных движением ОР СУЗ [Clusters of events caused by control and protection system movements]

Помимо определенно детерминированных классов (классы с низким коэффициентом вариации), существует достаточное количество классов, характеризующихся высоким коэффициентом вариации по количественным признакам. Данные события вызваны теми технологическими операциями, которым присущ некоторый стохастический компонент, сильно влияющий на форму сигнала. К таким можно отнести срабатывания регулирующей арматуры, события, источником, которых является ГЦН и др.

Мерой качества кластеризации в нашем случае является «похожесть» СКЗ сигналов друг на друга в диапазоне времен от времени прихода переднего фронта сигнала до начала затухания (например, на рис.8 это диапазон от 18 мс до 30 мс). При этом различимость кластеров друг от друга значения не имеет, важен сам факт принадлежности сигнала какому-либо из кластеров. В качестве меры «компактности» кластера возьмем величину (9):

$$D = \max_k \frac{\sqrt{\sum_{i=N_1}^{N_2} (s_k(t_i) - s_0(t_i))^2}}{\sqrt{\sum_{i=N_1}^{N_2} (s_0(t_i))^2}}, \quad (9)$$

где: $s_0(t_i)$ – центроид кластера, $i = \{0, 1, 2, 3, \dots, 2900\}$;

$s_k(t_i)$ – произвольное СКЗ из кластера, $k = \{0, 1, 2, 3, \dots, M\}$;

N_1 и N_2 – точка прихода переднего фронта и точка начала затухания.

Центроид кластера найден как (10):

$$s_0(t_i) = \underset{k}{\text{mediana}}\{s_k(t_i)\}, \quad k = \{0, 1, 2, 3, \dots, M\}. \quad (10)$$

«Достоверными» будем считать те кластеры, для которых D меньше определенного порога, по рассмотренным выше данным был выбран порог $D = 0.25$, при этом количество «достоверных» кластеров составило выше 85% для всех рассмотренных методов кластеризации.

Благодарность

Авторы выражают благодарность научному руководителю данного исследования, заместителю директора по науке АО «НТЦ «Диапром», к.т.н. Павелко В.И. за оказанную помощь при написании настоящей статьи.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Центр диагностики «Диапром». Система обнаружения свободных предметов в главном циркуляционном контуре ВВЭР-1000 (СОСП). – URL: <http://www.diaprom.com/projects/?p=2> (дата обращения: 27.05.2022).
2. Аркадов, Г.В. Системы диагностирования ВВЭР / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, Б.М. Финкель. – Москва : Энергоатомиздат, 2010. – 391 с.
3. Айвазян, С.А. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности / С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – Москва : Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
4. Скоморохов, А.О. Многомерные статистические методы диагностики аномальных состояний ЯЭУ : диссертация на соискание учений степени доктора технических наук / А.О. Скоморохов. – Обнинск, 2011. – 302 с.
5. Sculley, D. Web-scale k-means clustering // Proceedings of the 19th international conference on World wide web. – USA, 26 April 2010, P. 1177-1178 (in English).
6. Arthur, D., Vassilvitskii, S. k-means++: the advantages of careful seeding // Proceedings of the eighteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms. Society for Industrial and Applied Mathematics. – Philadelphia, PA, USA, 2007, P. 1027-1035(in English).
7. Ester, M., Krieger, H.-P., Sander, J., Xu, X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise // Proc. 2nd Int. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining. – Portland, OR, 1996, P. 226-231 (in English).
8. Mullin, T. DBSCAN Parameter Estimation Using Python. – Jul 10, 2020. – URL: <https://medium.com/@tarammullin/dbscan-parameter-estimation-ff8330e3a3bd> [дата обращения 27.05.2022] (in English).
9. Pedro Pereira Rodrigues, João Gama, Joao Pedro Pedroso Hierarchical Clustering of Time-Series Data Streams // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2008. –Vol. 20, No. 5, P. 615-627. – URL: https://www.researchgate.net/publication/3297889_Hierarchical_Clustering_of_Time-Series_Data_Streams [accessed 05/27/2022] (in English).
10. Жамбю, М. Иерархический кластер-анализ и соответствия / М. Жамбю – Москва : Финансы и статистика, 1988. – 345 с.
11. Amidon, A. How to Apply Hierarchical Clustering to Time Series / A. Amidon. Dec 9, 2020 – URL: <https://towardsdatascience.com/time-series-hierarchical-clustering-using-dynamic-time-warping-in-python-c8c9edf2fda5> (дата обращения: 27.05.2022).
12. Späth, H. Cluster Analysis Algorithms / H. Späth – Chichester: Ellis Horwood, 1980. – 226 p.

REFERENCES

- [1] Scientific and Technical Center «Diaprom». Systema obnaryzheniya svobodnikh predmetov v glavnom tzyrculyatzionnom konture VVER-1000(SOSP) [System for Detecting Loose Objects in the Main Circulation Circuit of PWR-1000 (SOSP)]. – URL: <http://www.diaprom.com/projects/?p=2> (accessed 05/27/2022) (in Russian).
- [2] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Finkel B.M. Systemy diagnostirovaniya VVER [PWR Diagnostic Systems]. Moskva: Energoatomizdat [Moscow: Energoatomizdat Publishing House]. 2010. 391 p. (in Russian).
- [3] Ayvazyan S.A., Bukhshtaber V.M., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. Prikladnaya statistika. Klassifikatsiya I snizhenie razmernosti [Applied Statistics. Classification and Dimensionality Reduction]. Moskva: Finansy I statistika [Moscow: Finance and Statistics, Publishing House]. 1989. 607 p. (in Russian).
- [4] Skomorokhov A.O. Mnogomerniye statisticheskiye metody diagnostiki anomalnich sostoyaniy YAYEU: dissertatsiya na soiskaniye ucheniy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Multidimensional Statistical Methods for Diagnosing Anomalous States of Nuclear Power Plants: Thesis for the Degree of Doctor of Technical Sciences]. Obninsk, 2011. 302 p. (in Russian).
- [5] Sculley D. Web-Scale K-Means Clustering // Proceedings of the 19th International Conference on World Wide Web. – USA, 26 April 2010, – P. 1177-1178 (in English).

- [6] Arthur D., Vassilvitskii S. K-Means++: the Advantages of Careful Seeding // Proceedings of the Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms. Society for Industrial and Applied Mathematics. – Philadelphia, PA, USA, 2007, P. 1027-1035 (in English).
- [7] Ester M., Kriegel H.-P., Sander J., Xu X. A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise // Proc. 2nd Int. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining. – Portland, OR, 1996, P. 226-231 (in English).
- [8] Mullin T. DBSCAN Parameter Estimation Using Python / T. Mullin; Jul 10, 2020. – URL: <https://medium.com/@tarammullin/dbscan-parameter-estimation-ff8330e3a3bd> (accessed 27/05/2022) (in English).
- [9] Pedro Pereira Rodrigues, João Gama, Joao Pedro Pedroso Hierarchical Clustering of Time-Series Data Streams // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2008. – Vol. 20, No. 5, P. 615-627. – URL: https://www.researchgate.net/publication/3297889_Hierarchical_Clustering_of_Time-Series_Data_Streams [reference date 27.05.2022] (in English).
- [10] Jambyu M. Ierarhicheskiy klaster-analiz I sootvetstviya [Hierarchical Cluster Analysis and Correspondences]. Moskva: Finansy I statistika [Moscow: Finance and Statistics, Publishing House], – 1988. – 345 p. (in Russian).
- [11] Amidon A. How to Apply Hierarchical Clustering to Time Series,. Dec 9, 2020. – URL: <https://towardsdatascience.com/time-series-hierarchical-clustering-using-dynamic-time-warping-in-python-c8c9edf2fda5> (accessed 05/27/2022) (in English).
- [12] Späth H. Cluster Analysis Algorithms – Chichester: Ellis Horwood, 1980. 226 p. (in English).

Clustering of Acoustic Events in Main Circulation Circuit of WVER 1000/1200 Reactor Facility Caused by Normal Technological Operations

© Gennadiy V. Arkadov¹, Irina V. Trykova², Konstantin I. Kotsoev³

^{1,2,3}Joint Stock Company "Scientific and Technical Center "Diaprom", Koroleva str., 6, Obninsk, Kaluga region, Russia 249031

³Bauman Moscow State Technical University, 2 Bauman str., 5/1, Moscow, Russia 105005

¹skrepka1964@gmail.com

²trykova@kvantprogramm.ru

³kotsoev@kvantprogramm.ru

Abstract. The appearance of free, weakly fixed and foreign objects in the main circulation circuit is not ruled out in reactor plants with a pressurized water power reactor. These objects, moving in the coolant flow, can collide with the inner walls of the main circulation circuit, which can lead to equipment damage. Early detection of these objects will minimize damage and improve the safety of NPP operation. The reactor plant is equipped with a system for detecting loose/weakly fixed objects for this purpose. The main problem is a large number of false alarms arising from the registration of noise from the normal operation of the NPP. The paper considers the application of clustering algorithms to signals of the system for detecting loose/weakly fixed objects, which can significantly reduce the number of false alarms as it has been established that signals from the operation of standard equipment are highly repeatable. Then, having "trained" the system on a certain archive of data characterizing the regular functioning of the NPP, we can state that if the newly received signal falls into one of the clusters, then it reflects the normal functioning of the NPP, while the signals do not that fell into any of the clusters may be the result of the appearance of a loose / loosely fixed object, and this situation requires an immediate response from the personnel operating the NPP. This approach makes it possible to reduce the amount of the system for detecting loose/weakly fixed objects output information significantly, reduce the load on the operating personnel, improve the quality of decisions made and, accordingly, increase the safety of operation of the reactor plant as a whole.

Keywords: nuclear power plant, reactor plant, acoustic signals, clustering, big data, loose and weakly fixed objects, equipment damage, operational safety, acoustic anomalies, early detection.

For citation: Arkadov G.V., Trykova I.V., Kotsoev K.I. Clustering of acoustic events in the main circulation circuit of a VVER 1000/1200 reactor facility caused by normal technological operations // Global nuclear safety. 2022. Vol. 3(44). P. 43-55. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-03-04>

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.5:681.5
doi: 10.26583/gns-2022-03-05

**ВАЛИДАЦИЯ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ ПРИВОДОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ
ЭНЕРГБЛОКОВ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ**

© 2022 Абидова Елена Александровна¹, Пугачева Ольга Юрьевна²

^{1,2}Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

¹e-abidova@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0258-5543>

²OYPugacheva@mephi.ru

Аннотация. В работе описывается модель, которая подтверждает достоверность методики диагностики приводов системы управления и защиты (СУЗ) энергоблоков реакторной установки. Модель имитирует работу объекта диагностирования, который генерирует сигналы, регистрируемые, сохраняемые и обрабатываемые системой диагностики приводов СУЗ. Указанная система разработана НИЯУ МИФИ в качестве пилотного образца, предназначенного для диагностики привода аварийного, регулирующего, компенсирующего (АРК) четвертого блока Нововоронежской АЭС и линейного шагового привода (ЛШП) пятого блока НВАЭС. Основным требованием к системе является способность выявлять наиболее часто встречающиеся дефекты приводов АРК и ЛШП. Система обладает многофункциональностью, мобильностью, компактностью и удобством в использовании, а ее технико-экономические показатели выше запатентованных объектов промышленной собственности, что свидетельствует о перспективности ее использования для контроля технического состояния электроприводов СУЗ с целью повышения безопасности АЭС. Разработана методика, которая устанавливает требования к содержанию и организации процедуры диагностирования приводов СУЗ с использованием комплексной информационной системы контроля технического состояния приводов СУЗ энергоблоков с реактором ВВЭР-440. Настоящая методика распространяется на привода СУЗ типа АРК и ЛШП, находящиеся в эксплуатации на АЭС и предназначена для специалистов, использующих систему диагностики по назначению. Валидация методики, положенной в основу работы системы, осуществляется путем обработки сигналов, имитирующих работу приводов в условиях наиболее часто встречающихся дефектов. В статье приводятся примеры симитированных сигналов, содержащих предусмотренные методикой диагностические признаки. Внедрение валидированной системы и методики позволит упростить задачу сбора, анализа, сравнения данных о приводах во время эксплуатации на АЭС, а также позволит повышать квалификацию персонала, что должно положительно сказаться на увеличении надежности и ресурсе оборудования.

Ключевые слова: привод СУЗ, система диагностики, диагностический сигнал, моделирование систем, диагностические признаки, валидация.

Для цитирования: Абидова Е.А., Пугачева О.Ю. Валидация методики контроля технического состояния приводов СУЗ энергоблоков РУ с использованием моделирования// Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 3(44). – С. 56-64. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-03-05>

Поступила в редакцию 11.06.2022

После доработки 29.08.2022

Принята к публикации 05.09.2022

Актуальность проблемы

Безопасность эксплуатации АЭС во многом обеспечивается надежностью систем управления и защиты реакторной установки (СУЗ РУ). В комплексе средств защиты СУЗ занимает важное место, обеспечивая поддержание необходимых штатных режимов работы и безопасность в аварийных ситуациях.

СУЗ РУ предназначена для пуска, регулирования мощности, компенсации избыточной реактивности и остановки реактора (в том числе, в аварийных ситуациях) путем введения в активную зону или выведения из неё поглощающих стержней. Исполнительным механизмом СУЗ РУ являются приводы СУЗ – устройства, предназначенные для изменения положения органа регулирования – поглощающих стержней. Контроль технического состояния приводов СУЗ имеет важное значение для безопасной эксплуатации АЭС. Он может осуществляться как в оперативном режиме, так и с использованием испытательных стендов.

Обзор информационных источников

Средства оперативного контроля технического состояния приводов СУЗ функционально ограничены из-за места расположения и условий эксплуатации приводов (работа в теплоносителе водо-водяного реактора под давлением). Контроль их состояния возможен только встроенными (штатными) средствами. Поэтому основным и, по существу, единственным диагностическим параметром является сигнал штатного датчика положения рабочего органа, по которому можно судить не только о его положении, но и о правильной отработке приводом команд управления [1].

Существенно большие возможности имеют системы контроля, используемые на испытательных стендах приводов СУЗ, которые есть на каждом блоке с реакторами ВВЭР. Основным направлением совершенствования подобных систем является, во-первых, автоматизация процессов сбора, регистрации, хранения и обработки информации, во-вторых – использование нескольких независимых каналов информации о состоянии привода: виброакустических шумов, напряжений и токов в электроприводе, температур обмоток и контактов [2, 3].

Существующие приборы и системы [2-5] выполняют в той или иной мере только отдельные функции предлагаемой системы, не предоставляют пользователю в автоматизированном режиме комплексную информацию о техническом состоянии СУЗ. При этом подавляющая часть аналогов контролирует только электрические параметры состояния.

Система контроля технического состояния приводов СУЗ

Институтом промышленных ядерных технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ) разработан и изготовлен опытно-промышленный образец комплексной информационной системы контроля технического состояния и ресурсных характеристик приводов СУЗ энергоблоков РУ ВВЭР-440 (далее КИС СУЗ или Система). Объектом диагностических испытаний являются привода СУЗ типа АРК и ЛШП. Система предназначена для автоматизации функций сбора, хранения, обработки, анализа и представления комплексной информации о техническом состоянии и ресурсных характеристиках приводов СУЗ. Применение КИС СУЗ не предполагает вмешательства в работу штатных систем и дополняет возможности стендов (стапелей) для испытаний СУЗ техническими и программными средствами получения, хранения и анализа диагностической информации.

Внешний вид опытно-промышленного образца Системы представлен на рисунке 1. В рамках разработки Системы был создан проект Методики диагностирования приводов СУЗ [6]. В основу Методики положен анализ наиболее

часто встречающихся дефектов привода СУЗ типа АРК и ЛШП и их проявлениям в диагностических сигналах. Как показал анализ, среди известных дефектов наиболее часто встречаются: затираание рейки в направляющих роликах АРК; короткое замыкание витков в обмотках двигателя АРК; дефект в подшипниках скольжения ЛШП.



Рисунок 1 – Внешний вид опытно-промышленного образца Системы [The exterior of the System prototype]

Система предусматривает выявление указанных дефектов с использованием следующих сигналов:

- 1) ток и напряжение в фазах 1-3 привода АРК, в фазах 1-4 привода ЛШП;
- 2) напряжение датчиков положения приводов АРК и ЛШП в зонах нижних и верхних конечных выключателей (НКВ и ВКВ) и зонах 1-9;
- 3) виброакустический сигнал.

Для регистрации указанных сигналов Система оснащена следующими датчиками: клещи токовые Fluke 80i-110s с кабелем (4 шт.); зажимы и преобразователи напряжения LV 25-400 (4 шт.); виброакустический датчик AP2037-10 (1 шт.) и другим оборудованием, необходимым для хранения и обработки данных. Измерительные каналы КИС СУЗ прошли успешную апробацию 29.09.2021 г. при стендовых испытаниях привода АРК четвертого и привода ЛШП пятого блока НВАЭС. В ходе апробации были зарегистрированы диагностические сигналы.

Методика диагностирования приводов СУЗ

Методика реализуется в соответствии со следующими задачами:

- 1) вычисление огибающей токового сигнала методом СКЗ;
- 2) вычисление огибающей виброакустического сигнала;
- 3) вычисление амплитудно-частотных спектров;
- 4) определение динамических характеристик привода (режим автоматического регулирования);
- 5) определение динамических характеристик привода АРК (режим аварийной защиты).

Следует отметить, что для вычисления огибающей токового сигнала используются следующие входные данные: один из массивов мгновенных значений тока и число точек – полуширина окна для вычисления СКЗ. Вычисление огибающей обеспечивает вычисление коэффициента пульсаций токов в фазах электродвигателя, как отношение размаха огибающей к арифметическому среднему значению. Коэффициенты пульсаций в разных фазах не должны отличаться более чем на 5 %.

Также следует отметить, что Методика определения скорости перемещения рейки привода в режиме автоматического регулирования реализуется для определения и контроля скорости перемещения рейки привода в каждой зоне при выполнении команды «Вверх» и «Вниз». Скорость перемещения рейки привода в зонах должна быть равномерной.

Методика определения динамических характеристик привода (режим аварийной защиты) направлена на определение времени перемещения рейки привода от верхнего

концевого выключателя до нижнего концевого выключателя при выполнении команды аварийной защиты. При необходимости возможно построение графика скорости перемещения рейки привода по команде аварийной защиты в каждой зоне для уточнения динамических характеристик привода (в первую очередь времени разгона рейки привода до скорости 200 мм/с). Методика реализуется для определения времени и скорости прохождения каждой зоны по команде аварийной защиты с одновременным контролем данных массивов виброакустического сигнала и спектра виброакустического сигнала. Одновременно с анализом выполняется контроль составляющих массива СКЗ виброакустического сигнала. Контроль заключается в сравнении мгновенного значения огибающей с уставкой на предельное значение уровня вибрации. При обнаружении превышения установленного уровня огибающей следует определить с использованием массива напряжения электрической цепи вторичных обмоток датчика положения, в какой зоне и на каком участке перемещения рейки привода произошло затирание рейки при перемещении по команде аварийной защиты.

Спектральный анализ дополняет анализ динамических характеристик. Анализ динамических характеристик привода позволит определить их отклонение внутри одного цикла выполнения команды автоматического регулирования. Если скорость перемещения рейки привода в зонах нижнего конечного выключателя, «0 – 9», верхнего конечного выключателя носит нестабильный характер, возможен механический дефект кинематических пар привода АРК. Для уточнения диагноза и определения конкретного дефектного узла следует выполнить анализ спектральных характеристик виброакустического сигнала VOGIB (виброскорости, виброперемещения и виброускорения) в зонах нижнего конечного выключателя, «0 – 9», верхнего конечного выключателя.

Решение диагностической задачи выполняется в следующей последовательности. Оценивается скорость перемещения рейки привода в каждой зоне в режиме автоматического регулирования. Если перемещение рейки привода осуществляется равномерно, без рывков, заеданий, то выполняется оценка спектральных характеристик привода с анализом виброакустического сигнала (или его огибающей) в каждой зоне и токового сигнала в соответствующей зоне. Если характерные параметры спектра («маска спектра») не отличается от эталонных в заданной частотной области, которая характеризует взаимодействия в соответствующих кинематических парах и не имеет изменяющегося тренда, или «прокола» «маски спектра» по амплитуде то можно предположить отсутствие дефектов в кинематических парах диагностируемого привода. Если скорость перемещения рейки привода в режиме АР не равномерна, наблюдаются рывки, заедания, то следует выполнить анализ спектральных характеристик виброакустического и токового сигналов в зонах, одновременно выполнить оценку СКЗ токового и виброакустического сигнала.

Если есть превышения значения уставки СКЗ токового сигнала и характеристик виброакустического сигнала в зонах, следует выполнить оценку спектральных характеристик (массива тока и массива вибраций) («маски спектра») по каждой зоне соответствующей кинематическим парам привода. Обнаруженные отклонения спектра – наличие места модуляции в районе характерных частот кинематических пар редуктора, пары рейка – реечная шестерня, подшипникового узла, направляющих роликов указывают на отклонения в их работе.

Методика позволяет достоверно выявить следующие три класса состояния привода АРК:

- 1) повышенное трение;
- 2) увеличенный боковой зазор в передачах редуктора;
- 3) дефект двигателя.

Состояние «повышенное трение» может быть конкретизировано следующими видами дефектов:

- 1) затирание рейки в направляющих роликах;
- 2) нарушение резьбового соединения блока перемещения;

Состояние «увеличенный боковой зазор в передачах редуктора» может быть дополнительно уточнено следующими видами дефектов:

- 1) пропуск шага;
- 2) расцепление защелки магнита;

Состояние «дефект двигателя» также может быть дополнено:

- 1) КЗ витков в обмотках ЭД;
- 2) повышенное трение в подшипниках на валу электродвигателя.

Модель для валидации методики контроля технического состояния

Однако регистрация в условиях стендовых испытаний на действующей АЭС имеет ограничения: не все возможные состояния могут быть воспроизведены без повреждения промышленного оборудования. Поэтому с целью валидации методики контроля технического состояния разработана расчетная модель, которая позволяет имитировать как исправную работу приводов, так и работу в условиях наиболее часто встречающихся дефектов [7]. Модель разработана с использованием среды SimInTech, поскольку данный продукт позволяет составлять и рассчитывать сложные системы [8]. Представляет собой два связанных блока: базовую модель и модель нагрузки [9, 10]. Также модель может дополняться блоками, имитирующими изменение параметров при наличии дефектов (деформация, инерция, трение) [11, 12]. Упрощенная структура модели для привода АРК представлена на рисунке 2.

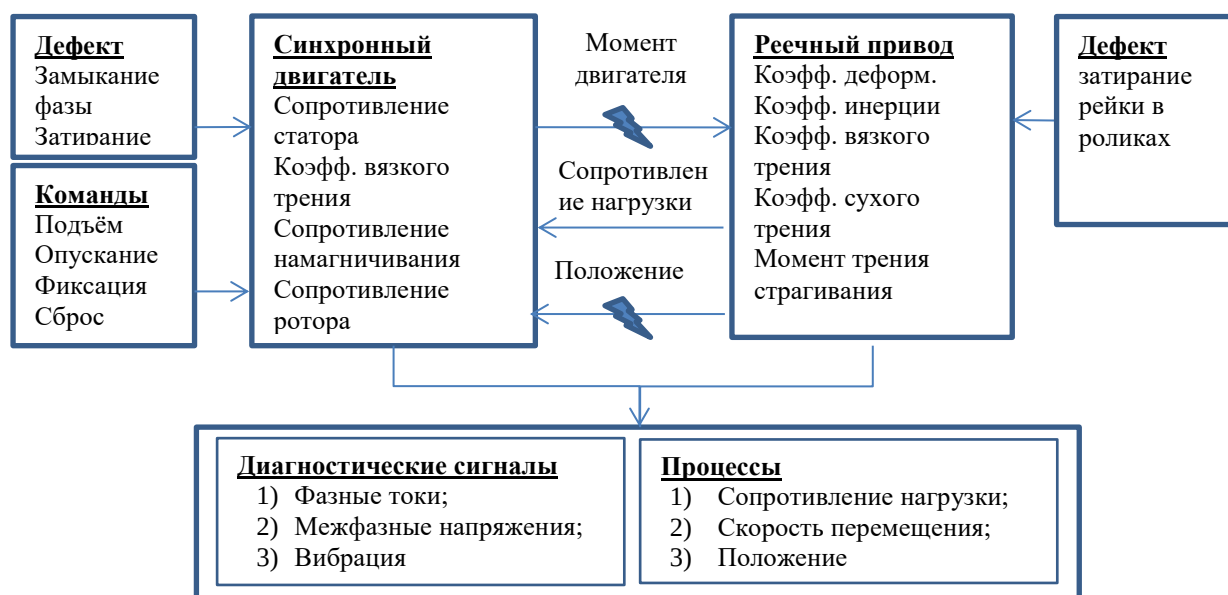


Рисунок 2 – Структура модели для валидации методики контроля технического состояния [Structure of the model for validation of the condition monitoring methodology]

Возможны настройка и подключение субмоделей дефектов в зависимости от вида и степени развития дефектов. Модель позволяет получить диагностические сигналы соответствующие проявлениям дефектов. Также модель учитывает возможные команды оператора и срабатывание технологических защит (ход вверх-вниз, останов, остановка в крайних положениях).

Результаты исследования

Одним из распространенных дефектов является затирание рейки в направляющих роликах. В соответствии с методикой основными признаками данного дефекта является повышение фазных токов и нестабильность скорости. На выходе модели получены

диагностические сигналы, по которым методика либо выявляет соответствующее состояние по возрастанию тока (рис. 3 а), либо исключает его (рис. 3 б)

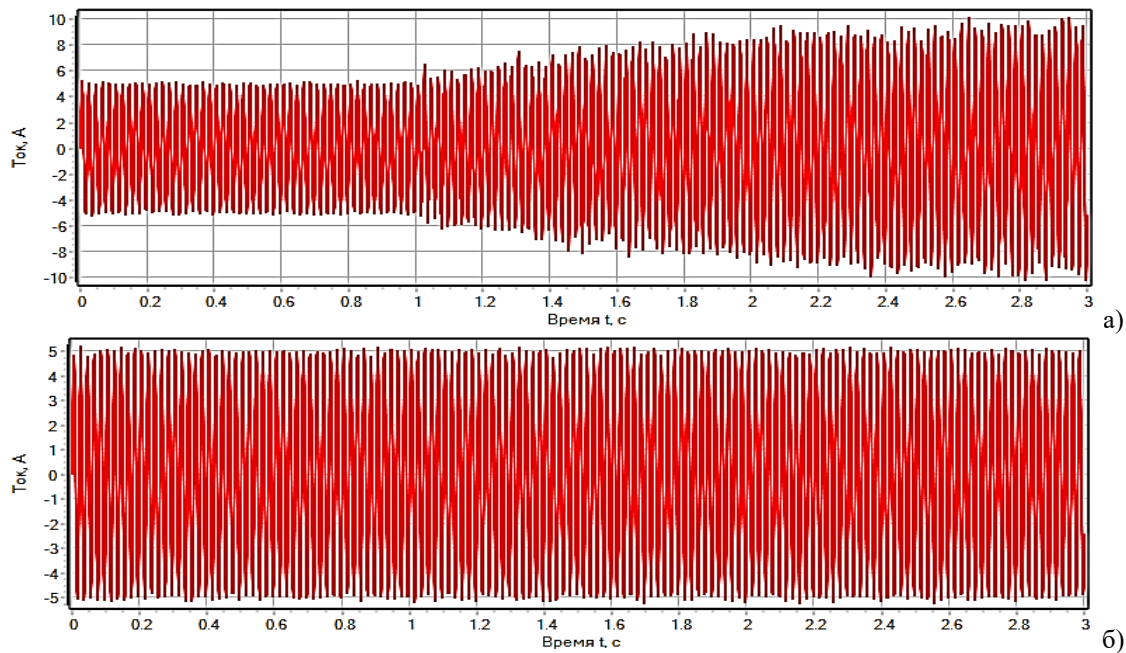


Рисунок 3 – Сигнал тока в одной из фаз двигателя привода АРК: а) с затиранием; б) без дефекта
[Current signal in one of the motor phases of the ARC drive: a) with mashing; b) without defect]

Разработанная модель обеспечивает возможность изучения процессов, характеризующих техническое состояние приводов. Так, на рисунке 4 визуализирована скорость перемещения привода, которая в режиме автоматического регулирования составляет 20 мм/с с допустимым отклонением ± 1 мм/с. Рисунок 4 а иллюстрирует скорость при полном перемещении из зоны нижних конечных выключателей (НКВ) в зону верхних (ВКВ) без существенных отклонений. Рисунок 4 б соответствует состоянию, которое классифицируется методикой как затирание, начинающееся с зоны №4.

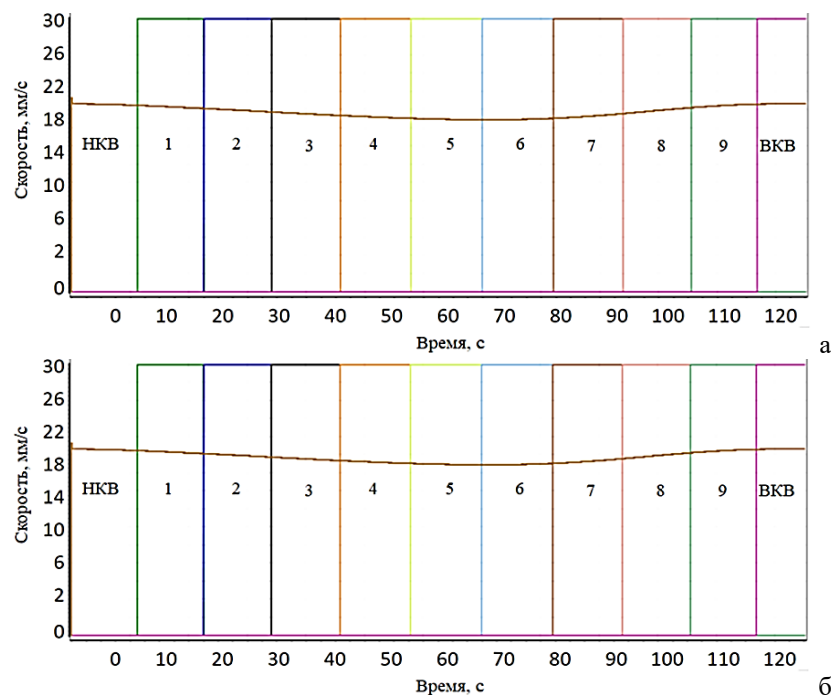


Рисунок 4 – Сигнал тока в одной из фаз двигателя привода АРК: а) без дефекта; б) с затиранием рейки привода [Current signal in one of the motor phases of the ARC actuator: a) without defect; b) with mashing of the drive rail]

Аналогично были получены сигналы при дефектах, идентификация которых предусмотрена методикой.

Результаты моделирования обеспечивают валидацию методики, подтверждая, что диагностические сигналы регистрируемые и обрабатываемые Системой обеспечивают выявление дефектов приводов СУЗ типа АРК и ЛШП.

Заключение

Созданная Система предназначена для автоматизации функций сбора, хранения, обработки, анализа и представления комплексной информации о техническом состоянии и ресурсных характеристиках приводов СУЗ. Разработанная Методика устанавливает требования к содержанию и организации процедуры диагностирования приводов СУЗ с использованием комплексной информационной Системы. Внедрение валидированной системы и методики позволит упростить задачу сбора, анализа, сравнения данных о приводах во время эксплуатации на АЭС. Результаты моделирования также могут быть использованы в производственной практике АЭС для обучения персонала диагностике и настройке приводов СУЗ. Система сочетает в себе различные способы контроля технического состояния электроприводов СУЗ, а модульная структура аппаратной части и программного обеспечения позволяет модифицировать ее под конкретные задачи, что дает возможность получить более достоверный диагностический прогноз. Система обладает многофункциональностью, мобильностью, компактностью и удобством в использовании, а ее технико-экономические показатели выше запатентованных объектов промышленной собственности, что свидетельствует о перспективности ее использования для контроля технического состояния электроприводов СУЗ с целью повышения безопасности АЭС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Erd A., Stokłosa J.: Main Design Guidelines for Battery Management Systems for Traction Purposes. Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference Automotive Safety 2018. Slovakia, 2018, DOI: 10.1109/AUTOSAFE.2018.8373345
2. Babaa F. Experimental investigation and comparative study of interturn short-circuits and unbalanced voltage supply in induction machines / F. Babaa, A. Khezzar, M. el kamel Oumaamar // *Frontiers in Energy*. – 2013. – Vol. 7. – Is. 3. – P. 271-278. DOI: 10.1007/s11708-013-0258-6
3. Mazzeletti M.A., Bossio G.R., Angelo C.H. de, Espinoza-Trejo D.R. A model-based strategy for interturn short-circuit fault diagnosis in PMSM // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2017. – Vol. 64. – Is. 9. – P. 7218-7228. DOI: 10.1109/TIE.2017.2688973
4. Пат. 2529596 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/06. Способ диагностики межвитковых замыканий асинхронного электродвигателя / И.Ф. Суворов, Р.В. Горбунов, Г.А. Палкин, Д.В. Коряков; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет». — № 2013110594; заявл. 11.03.2013; опубл. 27.09.2014; Бюл. № 27. – 8 с.
5. Пат. 2537518 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/06. Способ диагностики межвитковых замыканий асинхронного электродвигателя / И.Ф. Суворов, Р.В. Горбунов, Г.А. Палкин, Д.В. Коряков; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет». — № 2013110600; заявл. 11.03.2013; опубл. 10.01.2015; Бюл. № 1. – 6 с.
6. Абидова, Е.А. Методика диагностирования состояния электромеханических приводов систем управления и защиты реакторной установки / Е.А. Абидова, М.А. Белоус, Л.С. Хегай, А.В. Чернов // *Инженерный вестник Дона*. – 2017. – № 4. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4493.
7. Ayyappan, G.S.; Nikhil, N.K.; Raja, R.M.; Pandi, R.V.; Angel, T.S.; Babu, R.B. Electrical Motor Maintenance Techniques and Life Cycle Assessment — A Review with Case Studies. In Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC), Chennai, India, 21–23 August 2019; Volume 2019, P. 167-172.
8. Карташов, Б.А. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech / Б.А. Карташов, Е.А. Шабаев, О.С. Козлов, А.М. Щекатуров. – Москва : ДМК Пресс. – 2017. – 424 с.

9. *Иванов, В.Э.* Малошумящий программируемый усилитель постоянного тока с дистанционным управлением / В.Э. Иванов, Ен Ун Чье // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2019. – № 22(4). – С. 99-108.
10. *Иванов, В.Э.* Аналитическая модель усилителя постоянного тока с цифровым управлением / В.Э. Иванов // Информационные технологии XXI века: сборник научных трудов. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. унта. – 2021. – С. 70-76.
11. Ivanov V.E. Iterative Balancing Algorithm for Multistage DC Amplifiers / V.E. Ivanov, En Un Chye // 2021 Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) / Proceedings. Kazan Federal University, Kazan, Russia, May 13–15. – 2021.
12. *Калачев, Ю.Н.* Преобразователи автономных источников электроэнергии / Ю.Н. Калачев, А.Г. Александров. – Москва : ДМК Пресс. – 2021. – 80 с.

REFERENCES

- [1] Erd A., Stoklosa J.: Main Design Guidelines for Battery Management Systems for Traction Purposes. Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference Automotive Safety 2018. Slovakia, 2018, DOI: 10.1109/AUTOSAFE.2018.8373345 (in English).
- [2] Babaa, Fatima, Abdelmalek Khezzar, and Mohamed el kamel Oumaamar. «Experimental investigation and comparative study of interturn short-circuits and unbalanced voltage supply in induction machines». *Frontiers in Energy*. 7.3 (2013): 271-278. DOI: 10.1007/s11708-013-0258-6 (in English).
- [3] Mazzoletti, Manuel A., Guillermo R. Bossio, Cristian H. De Angelo, and Diego R. Espinoza-Trejo. «A model-based strategy for interturn short-circuit fault diagnosis in PMSM». *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 64.9 (2017): 7218-7228. DOI: 10.1109/TIE.2017.2688973 (in English).
- [4] Suvorov, I.F., R.V. Gorbunov, G.A. Palkin, and D.V. Koryakov. RU 2 529 596, IPC G 01 R 31/06. Sposob diagnostiki mezhvitkovykh замыканий асинхронного электродвигателя [Patent 2529596 Russian Federation, IPC G 01 R 31/06. Method For Diagnosing Inter-Turn Faults in Asynchronous Electric Motor]. FGBOU VO «Zabajkal'skij gosudarstvennyj universitet» [FSBEIU VPO «Zabaykalsky State University»]. Publ. 27 Sept. 2014 (in Russian).
- [5] Suvorov, I.F., R.V. Gorbunov, G.A. Palkin, D.V. Koryakov. RU 2 537 518, IPC G 01 R 31/06. Sposob diagnostiki mezhvitkovykh замыканий асинхронного электродвигателя [Patent 2537518 Russian Federation, IPC G 01 R 31/06. Method for diagnosing inter-turn faults in asynchronous electric motor]. FGBOU VO «Zabajkal'skij gosudarstvennyj universitet» [FSBEIU VPO "Zabaykalsky State University"]. Publ. 10 Jan. 2015 (in Russian).
- [6] Abidova E.A., Belous M.A., Hegai L.S., Chernov A.V. Metodika diagnostirovaniya sostoyaniya ehlektromekhanicheskikh privodov system upravleniya I zashchity reaktornoj ustanovki [Methodology of Diagnosing the Condition of Electromechanical Drives of Reactor Plant Control and Protection Systems]. *Inzhenernyj vestnik Dona* [The Don Engineering Herald]. 2017. No. 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4493 (in Russian).
- [7] Ayyappan, G.S.; Nikhil, N.K.; Raja, R.M.; Pandi, R.V.; Angel, T.S.; Babu, R.B. Electrical Motor Maintenance Techniques and Life Cycle Assessment – A Review with Case Studies. In Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC), Chennai, India, 21–23 August 2019. Volume 2019. P. 167-172 (in English).
- [8] Kartashov B.A., Shabaev E.A., Kozlov O.S., Shchekaturov A.M. Sreda dinamicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh system SimInTech [Dynamic Simulation Environment of Technical Systems SimInTech]. Moscow: DMK Press. 2017. 424 p. (in Russian).
- [9] Ivanov V.E., En Un Chye. – Maloshumjashhij programmiruemyj usilitel' postojannogo toka s distancionnym upravleniem [Low Noise Programmable DC Amplifier with Remote Control]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij Rossii. Radioelektronika* [News of Higher Educational Institutions of Russia. Radio Electronics]. 2019. № 22(4). P. 99-108 (in Russian).
- [10] Ivanov V.E. Analiticheskaja model' usilitelja postojannogo toka s cifrovym upravleniem [Analytical Model of Digitally Controlled DC Amplifier] // *Informacionnye tehnologii XXI veka: sbornik nauchnyh trudov* [Information Technologies of the XXI Century: a collection of scientific papers]. Khabarovsk: Pacific Publishing. state university. 2021. P. 70-76 (in Russian).
- [11] Ivanov V.E. Iterative Balancing Algorithm for Multistage DC Amplifiers / V.E. Ivanov, En Un Chye // 2021 Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) / Proceedings. Kazan Federal University, Kazan, Russia, May 13-15. 2021 (in English).
- [12] Kalachev Ju.N., Alexandrov A.G. Preobrazovateli avtonomnyh istochnikov jelektroenergii [Converters of Autonomous Power Sources]. Moscow: DMK Press. 2021. 80 p. (in Russian).

Validation of Methodology of Monitoring Drives Technical Condition of Control and Protection System of Reactor Installation Power Units Using Modeling

© Elena A. Abidova¹, Olga Yu. Pugacheva²

^{1,2}*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

¹*e-abidova@mail.ru, ORCID iD: 0000-0003-0258-5543, WoS Researcher ID: O-1870-2018*

²*OYPugacheva@mephi.ru*

Abstract. The paper describes a model that confirms the reliability of the diagnostic methodology for the drives of the control and protection system (CPS) of the power units. The model simulates the operation of the diagnostic object which generates signals that are recorded, stored and processed by the Diagnostic System of the CPS drives. This system was developed by MEPhI as a pilot sample designed to diagnose the drive of the ARC of the fourth block of the Novovoronezh NPP and the drive of the LSD of the fifth block of the Novovoronezh NPP. The main requirement for the system is the ability to identify the most common defects in the drives of the ARC and LSD. The system has versatility, mobility, compactness and ease of use, and its technical and economic indicators are higher than the patented objects of industrial property, which indicates the prospects of its use for monitoring the technical condition of the electric drives of CPS in order to improve the safety of NPP. A methodology is developed which establishes the requirements for the content and organization of the procedure for diagnosing CPS drives using a comprehensive information system for monitoring the technical condition and resource characteristics of CPS drives of power units of the reactor WWER-440. This technique applies to the drives of CPS of the ARK and LSD type, which are in operation at nuclear power plants and is intended for specialists who use diagnostic system of CPS for their intended purpose. Validation of the methodology underlying the operation of the system is carried out by processing signals simulating the operation of drives in conditions of the most common defects. The article provides examples of simulated signals containing signs of defects provided by the methodology. The introduction of a validated system and methodology will simplify the task of collecting, analyzing, and comparing data on drives during operation at nuclear power plants, and will also improve the qualifications of personnel, which should have a positive impact on increasing the reliability and resource of equipment.

Keywords: CPS drive, diagnostic system, diagnostic signal, system modeling, diagnostic signs, validation.

For citation: Abidova E.A., Pugacheva O.Yu. Validation of Methodology of Monitoring Drives Technical Condition of Control and Protection System of Reactor Installation Power Units Using Modeling // Global nuclear safety. 2022. № 3(44). P. 56-64. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-03-05>

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.546:519.245
doi: 10.26583/gns-2022-03-06

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ АКСИАЛЬНОГО
ПРОФИЛИРОВАНИЯ ТВС РЕАКТОРА ВВЭР-1200
НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛИ Z49A2**

© 2022 Гердт Эдуард Аликович¹, Внуков Руслан Адхамович²

^{1,2}Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Обнинск, Калужская обл., Россия

¹eduard_gerdt@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7771-0244>

²ravnukov@oiate.ru

Аннотация. Для улучшения параметров реакторных установок и снижения стоимости вырабатываемой электроэнергии проводятся исследования, направленные на определение наиболее рационального использования топлива. Различные методы используют различные математические и физические модели, что приводит к некоторому различию в получаемых данных. Одним из таких методов является профилирование ТВС. В данной работе приводится теория, применяемая в моделировании и расчетах программным комплексом Serpent 2, рассматриваются методы аксиального профилирования составов в реакторной установке, проводится сравнение полученных результатов и обоснование их достоверности на промежуточном этапе исследования.

Ключевые слова: профилирование, анализ, ПК Serpent 2, метод Монте-Карло, выгорание, поток нейтронов, математическое моделирование, ТВС, реакторная установка, выгорающий поглотитель.

Для цитирования: Гердт Э. А., Внуков Р. А. Сравнительный анализ методов аксиального профилирования ТВС реактора ВВЭР-1200 на примере модели Z49A2 // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 3(44). – С. 65–72. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-03-06>

Поступила в редакцию 20.06.2022

После доработки 01.09.2022

Принята к печати 07.09.2022

Расчёты нейтронно-физических процессов в программном комплексе Serpent 2 [1] проводятся на основе метода Монте-Карло, суть которого в общем случае заключается в генерации псевдослучайных чисел, над которыми итерационно проводятся операции, необходимые для получения ожидаемого результата. В нейтронно-физических расчетах метод Монте-Карло используется ввиду непредсказуемости поведения нейтронов в активной зоне реакторной установки. Причина, по которой данный метод так хорошо подходит для расчёта процессов переноса – нейтроны взаимодействуют лишь со средой, в которой происходит деление, но не взаимодействуют друг с другом. Простота и потенциал производить очень точные результаты являются одними из самых привлекательных качеств метода Монте-Карло [2].

За относительно недолгий период развития ядерной физики было собрано огромное количество данных о ядерных взаимодействиях [3], которые объединили в библиотеки, однако эти данные не могут быть использованы для нейтронно-физических расчетов непосредственно, поскольку в них энергетический спектр представляется точечным.

Метод Монте-Карло, реализованный в ПК Serpent 2, позволяет считать в непрерывном энергетическом спектре, потому что влечет за собой некоторые потери в точности расчёта.

Таким образом, для полноценного расчёта на первом этапе происходит дискретизация данных о взаимодействии нейтронов со средой, на втором – разбиение геометрии активной зоны. Совмещенные физическая и геометрическая модели позволяют получить полноценную симуляцию действительного объекта расчёта (ТВЭЛ, ТВС или АЗ).

Из всего вышесказанного очевидно, что метод Монте-Карло из-за самой своей сути имеет некоторую погрешность, которую необходимо оценить.

Целью проводимого исследования является оценка влияния аксиального профилирования ТВЭГов в ТВС реактора ВВЭР-1200 [4] на нейтронно-физические характеристики элемента реакторной установки на примере модели Z49A2 [5] с разбиением на 5 зон по высоте. В конечном результате ожидается продление топливной кампании ТВС за счет снижения темпа потери реактивности и увеличения значения эффективного коэффициента размножения нейтронов (k_{eff}) в конце кампании РУ. В данной статье же рассматриваются методы профилирования, отличающиеся критериями профилирования (поток нейтронов и выгорание делящихся материалов) и применяемые к одной и той же геометрической модели ТВС с разбиением на 5 зон по высоте, то есть сравнивается профилирование пропорционально потоку и пропорционально выгоранию; рассматриваются математические модели, используемые программным комплексом Serpent 2 для расчета в одном и в другом случае, а также результаты, получаемые посредством применения вышеупомянутых подходов.

Профилирование – это процесс перераспределения компонентов по объему активной зоны с целью улучшения выходных показателей реакторной установки, которые описывают ее в целом. Далее такие показатели будут называться функционалами. В данном случае проводилось перераспределение концентраций изотопов топлива по высоте ТВЭГов.

Профилирование проводилось на примере модели ТВС Z49A2 с использованием ПК Serpent 2. При выборе подхода к профилированию мы остановились на выравнивании нейтронного поля в начале кампании и выравнивании поля выгорания к концу кампании. Таким образом, необходимо рассмотреть, как осуществляется расчёт выгорания и потока нейтронов в ПК Serpent 2. Далее описанные подходы будут для краткости обозначены как метод «по потоку» и метод «по выгоранию».

Расчёт выгорания осуществляется посредством решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) изменения изотопного состава отслеживаемых нуклидов [7]. Для этого применяется так называемый метод predictor-corrector (PC), включающий в себя методы Эйлера для решения системы ОДУ и правило трапеций.

На первом этапе (predictor) в программном комплексе, начиная с некоего начального значения функции y_i в точке i , выполняется приблизительное вычисление значения функции в точке $i+1$, после чего, согласно правилу трапеций, проводится оценка (этап evaluate) и корректировка полученного значения (этап corrector). В зависимости от того, сколько раз применяется этап corrector выделяют различные модификации PC-метода: PEC (predictor-evaluate-corrector), PECE, PECECE и так далее [8]. В случае проводимого исследования был использован PEC-метод.

Расчет потока в ПК Serpent 2 производится посредством методов понижения дисперсии, используемых в случаях, когда накопление оценки требует достаточно большого количества времени, либо, когда без их использования оценку накопить не удастся [9]. В частности, одним из таких методов, реализуемых в Serpent 2, является метод весовых окон.

Коды, основанные на методе Монте-Карло, используют так называемые виртуальные частицы, одна из которых соответствует некоторому количеству

физических определенных частиц. Количество физических частиц, соответствующих одной виртуальной, называют весом. Однако это число определяется в некотором доверительном интервале погрешностей – весовом окне. Решение нейтронно-физических задач требует того, чтобы принимать во внимание зависимость весового окна от энергии частиц, что вводит дополнительные трудности при проведении расчетов [9].

При рассмотрении реальной реакторной установки (далее РУ), одним из параметров, остающимся постоянным в течение всей кампании, принимается ее мощность P – количество выделяемой энергии в единицу времени. Поскольку в РУ энергия выделяется за счет деления в основном ядер урана-235 (U^{235}), можно записать уравнение (1):

$$P = f_5 \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

где f_5 – число делений ядра в единицу времени в единице объёма;

ε – энергия, выделяемая в одном акте деления.

В то же время f зависит от потока нейтронов в некоторой области среды следующим образом, уравнение (2):

$$f = \Phi \cdot \sigma_5^f \cdot \rho_5, \quad (2)$$

где Φ – поток нейтронов в данной точке в данный момент времени;

σ_5^f – микроскопическое сечение деления для ядра среды;

ρ_5 – концентрация ядер U^{235} в единице объёма.

Принимая во внимание уравнения (1) и (2), получаем выражение (3):

$$P = \Phi \cdot \sigma_5^f \cdot \rho_5 \cdot \varepsilon \quad (3)$$

или при постоянных σ , ν и ε

$$P \sim \Phi.$$

Данные рассуждения справедливы, если учитывать, что в достаточно широком спектре энергий микроскопические сечения от энергии налетающего нейтрона зависят слабо, то есть если не рассматривать области резонанса, либо само энергетическое распределение не претерпевает существенных изменений при процедуре профилирования. В рамках работы выдвигается предположение, что изменения, вносимые в пространственно-энергетическое распределение нейтронов, несущественны для модели реактора и мало отличаются при использовании методов.

Выгорание, в свою очередь, можно, согласно размерности данной величины (МВт·сут/кг), представить как $B = \frac{P \cdot t}{m_T}$, где t – время, m_T – масса топлива. Переписав данное уравнение, получаем выражение (4):

$$P = \frac{B \cdot m_T}{t} \quad (4)$$

или для конкретной временной точки

$$P \sim B.$$

Таким образом, из выражений (3) и (4) можно сделать вывод, что, вообще говоря, методы «по потоку» и «по выгоранию» эквивалентны с точки зрения физики,

хоть и используются разные характеристики для рассмотрения поведения реакторной установки в течение кампании, однако с точки зрения расчета, как было сказано ранее, они совершенно различны, следовательно, погрешности получаемых данных (отклонения в случае статистической оценки выходных характеристик) так же будут различны.

Процедура исследования имеет следующую методологию: в течение кампании реакторной установки происходит выгорание топлива, при том, неравномерно (в настоящем случае речь об аксиальной неравномерности). В зависимости от плотности потока нейтронов в некоторых зонах топливо выгорает сильнее, чем в других. Это явление представляет проблему рационального использования выгорающего материала. Решением является выравнивание функции энерговыделения (либо нейтронного поля) по высоте активной зоны ТВС [10-11]. Из приведенных ранее рассуждений будет справедливо сказать, что мы приходим к необходимости увеличения равномерности либо выгорания, либо потока нейтронов по высоте твэга/твэла.

Выравнивание нейтронного поля в начале кампании или выравнивание поля выгорания к концу кампании достигается из следующих соображений: в топливных таблетках твэгов ТВС присутствует, помимо диоксида урана, оксид гадолиния – выгорающий поглотитель нейтронов, который добавляется с целью снижения избыточной реактивности в начале кампании РУ. Рассматривая лишь твэги в ТВС и принимая каждый из них равнозначным остальным, проводилось перераспределение выгорающего поглотителя, если конкретнее, изотопа гадолиния-155 (Gd^{155}), который имеет самое высокое сечение поглощения нейтронов.

Для начала проводился расчет «нулевой модели», в которой концентрации всех изотопов в каждой зоне по высоте были одинаковыми. Таким образом, получались данные о выгорании (или потоке нейтронов) в твэгах. Далее проводилось профилирование, согласно следующим рассуждениям: если в некоторой зоне выгорание (поток) избыточны, туда необходимо распределить больше Gd^{155} (относительно исходной концентрации), чтобы его компенсировать; где выгорание недостаточно – там концентрацию выгорающего поглотителя необходимо уменьшить. Одновременно с перераспределением концентраций изотопов во внимание принимался тот факт, что до и после профилирования суммарное количество изотопов во всем твэге должно остаться неизменным.

Соблюдение этих закономерностей выполнялось посредством введения коэффициентов a и b : $a = \frac{\delta_i}{\delta_{cp}}$, где δ_i – выбранная характеристика (поток или выгорание) в данной зоне, δ_{cp} – средняя выбранная характеристика по всей высоте твэга. Коэффициент b вводится для корректировки значений концентраций в соответствии с законом сохранения числа изотопов: $b = \frac{\Sigma N_{нов}}{\Sigma N_{стар}}$, и представляет собой отношение суммарного числа изотопа Gd^{155} после профилирования ($\Sigma N_{нов}$) к суммарному числу того же изотопа до профилирования ($\Sigma N_{стар}$). После пересчета концентрации одного изотопа производится пересчет концентраций всех остальных изотопов в топливной таблетке.

Полученные посредством данного подхода значения после первой итерации представлены на рисунке 1. Стоит отдельно сказать, что в рамках исследования, в соответствии с целью, нас больше интересуют начальные и конечные значения коэффициента размножения нейтронов, нежели изменение k_{eff} в течение всей кампании.

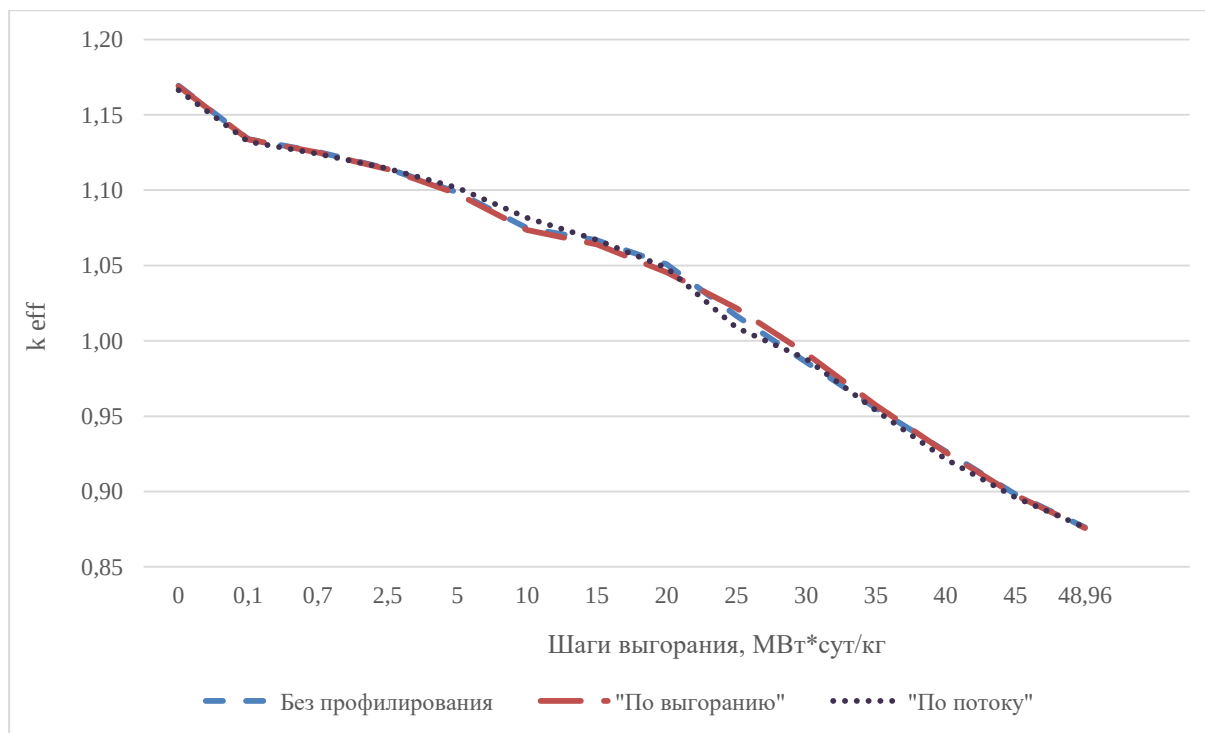


Рисунок 1 – График падения реактивности для метода «по выгоранию» [Graph of reactivity drop for the "burn-in" method]

По полученным данным k_{eff} построен график (рис. 2), на котором прослеживается различие между методами «по выгоранию» и «по потоку» во времени. Поскольку построенная модель ТВС не содержит регулирующих стержней, скорость выгорания топлива в начале кампании выше, чем в действительности, а в конце кампании ниже. Этим, предположительно, обусловлены высокие различия методов в середине кампании, однако в конце моделируемой кампании процессы максимально близки к действительности, потому нас интересует лишь последняя временная точка, в которой различие методов находится в пределах погрешности 3σ ($3\sigma = 45$ pcm, $\Delta = 41$ pcm). Таким образом, наблюдаемый результат подтверждает эквивалентность методов.

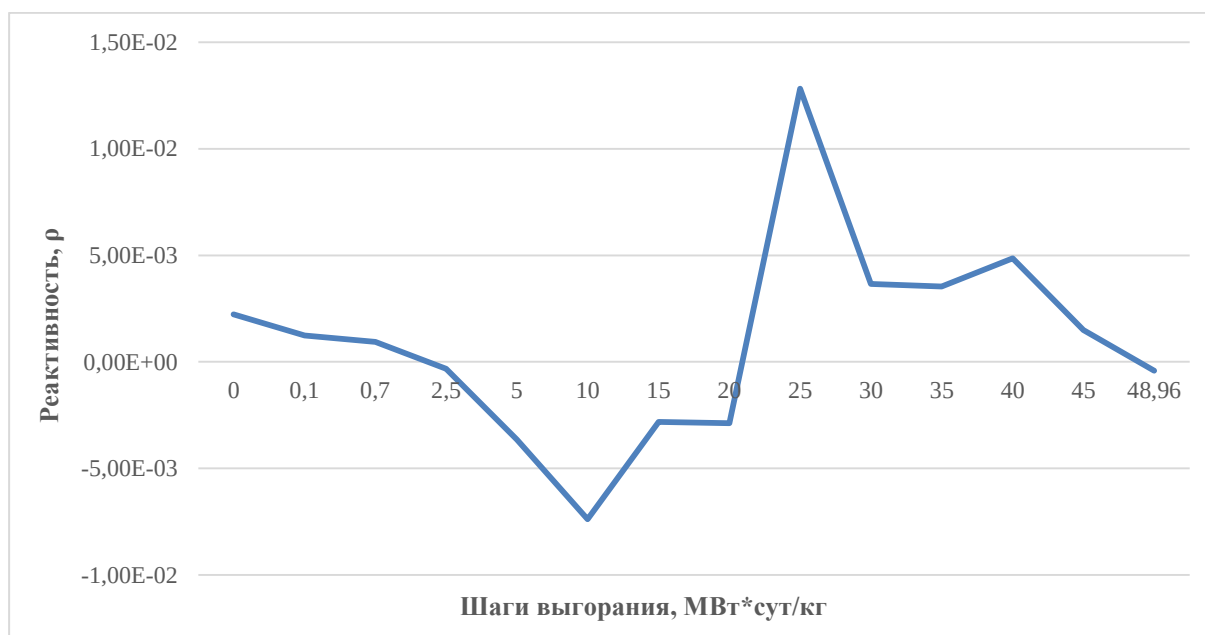


Рисунок 2 – Различия методов в каждой временной точке [Difference of methods at each time point]

Однако для оценки эффектов реактивности, обоснования приемлемости методов с позиции нейтронно-физических аспектов необходимо получать более близкие значения к реальным на протяжении всей кампании [12]. Значительное расхождение ρ в методах в середине кампании требует вывода о том, какой метод является точным в каждый момент времени. В случае расчета «по потоку» погрешность метода обусловлена статистической погрешностью расчета в 0-ой момент времени. Для метода «по выгоранию» погрешность предположительно накапливается как начальным отклонением, так и конечным, поскольку состав определяется по выходным данным последней временной точки. Таким образом, метод «по потоку» для расчета эффектов реактивности перспективнее метода «по выгоранию».

Возможность снижения темпа потери реактивности установки и возможность продления топливной кампании за счет увеличения реактивности в конце кампании в сравнении с моделью без профилирования продемонстрирована результатами профилирования твэгов в ТВС. Для конкретного обоснования и подтверждения результатов в будущем необходимо продолжить итерационный расчет и переходить от модели ТВС к модели всей активной зоны РУ с уточнением деталей физики и конструкции установки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Leppänen, J. Serpent – a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. User manual, June 18, – 2015. Tuominen, R., Valtavirta, V. and Leppänen, J. New energy deposition treatment in the Serpent 2 Monte Carlo transport code. Ann. Nucl. Energy 129 (2019). P. 224-232.
2. Leppänen, Jaakko. Development of a New Monte Carlo Reactor Physics Code [Uuden Monte Carlo -reaktorifysiikkakoodin kehittäminen]. Espoo. – 2007 VTT Publications 640 228 p. + app. 8 p.
3. IAEA Nuclear Data Services. – URL: <https://www-nds.iaea.org/> (accessed: 07/30/2022).
4. Абу Сондос, М.А. Оценка возможности использования Eu_2O_3 в качестве выгорающего поглотителя в реакторе ВВЭР-1200 / М.А. Абу Сондос, В.М. Демин, В.И. Савандер // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 1(30). – С. 39-46. DOI: <https://doi.org/10.26583/gns-2019-01-04>.
5. Внуков, Р.А. Влияние размещения выгорающего поглотителя на нейтронно-физические характеристики тепловыделяющей сборки ВВЭР-1200 / Р.А. Внуков, В.В. Колесов, И.А. Жаворонкова, Я.А. Котов, М.Р. Праманик // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2021. – № 2. – С. 27-38. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2021.2.03>
6. Butcher, John C. Numerical Methods for Ordinary Differential Equations // New York: John Wiley & Sons. 2003.
7. Фейнберг, С.М. Выгорание горючего в водо-водяных энергетических реакторах и эксперименты с уран-водной решеткой / С. М. Фейнберг, [и др.]. – URL : http://elib.biblioatom.ru/text/doklady-zheneva-1958_t2_yadernye-reaktory_1959/go,412/ (дата обращения: 27.07.2022)
8. Васютин, Н.А. Решение проблем при использовании генератора весовых окон расчетного кода на основе метода Монте-Карло / Н.А. Васютин, О.Л. Ташлыков // Труды третьей научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. – Екатеринбург: УрФУ, 2018. – С. 329-332.
9. Зуев, А.А. Анализ применения аксиального профилирования твэг / А.А. Зуев // Материалы 16-й научно-технической конференции молодых специалистов ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 26-27 марта 2014 г. – Подольск, 2014. – URL : <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2014/documents/kms2014-005.pdf> (дата обращения: 12.07.2022)
10. Савандер, В.И. Аксиальное профилирование поля энерговыделения для минимизации объемной доли пара на выходе из ТВС ВВЭР-1200 / В. И. Савандер, Б.Е. Шумский, А.А. Пинегин // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2015. – № 2. – С. 25-35.
11. Патент RU 2001 127 049 А МПК G21C 3/326. Способ снижения неравномерности распределения теплотехнических запасов в тепловыделяющих сборках активной зоны ядерного реактора: заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Новосибирский завод химконцентратов», Опытное конструкторское бюро «Гидропресс». – № 2001127049/06 ; заявл. 10.04.2001 ; опубл. 20.12.2003, Пономаренко Г.Л., Васильченко

- И.Н., Горохов А.К., Кобелев С.Н., Наумов В.И., Енин А.А., Кушманов А.И., Чапаев И.Г. – URL: <https://www.freepatent.ru/patents/2219600> (дата обращения: 26.07.2022)
12. Колесов, В.Ф. Истоки неточностей в реактивности, определяемой с помощью обращенного решения уравнений кинетики/ В.Ф. Колесов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика ядерных реакторов. – 2013. – № 3. – С. 30-45.

REFERENCES

- [1] Leppänen, J. "Serpent – a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code." User manual, June 18, 2015. Tuominen, R., Valtavirta, V. and Leppänen, J. "New energy deposition treatment in the Serpent 2 Monte Carlo transport code." Ann. Nucl. Energy 129 (2019) 224-232 (in English).
- [2] Leppänen, Jaakko. Development of a New Monte Carlo Reactor Physics Code [Uuden Monte Carlo -reaktorifysiikkakoodin kehittäminen]. Espoo 2007 VTT Publications 640 228 p. + app. 8 p. (in English).
- [3] IAEA Nuclear Data Services. – URL: <https://www-nds.iaea.org/> (accessed: 07/30/22) (in English).
- [4] M.A. Abu Sodos, V.M. Demin, V.I. Savander. Ocenka vozmozhnosti ispol'zovaniya Eu_2O_3 v kachestve vygorayushchego poglotitelya v reaktore VVER-1200 [Assess of Possibility of Eu_2O_3 Using as Burnable Absorber in WVER-1200 Reactor] // Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2019. № 1(30). – P. 39-46 (in Russian)/ DOI: <https://doi.org/10.26583/gns-2019-01-04>
- [5] Vnukov R.A., Kolesov V.V., Zhavoronkova I.A., Kotov Y.A., Pramanik M.R. Vliyanie razmeshcheniya vygorayushchego poglotitelya na nejtronno-fizicheskie harakteristiki teplovdyel'ayushchej sborki VVER-1200 [Effect of the Burnable Absorber Arrangement on the WVER(1200 Fuel Assembly Neutronic Performance). Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika [News of Higher Education Institutions. Nuclear Power Engineering]. 2021. №2. P. 27-38 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2021.2.03>
- [6] Butcher, John C. Numerical Methods for Ordinary Differential Equations // New York: John Wiley & Sons. 2003. (in English)
- [7] Feinberg S.M., Antsiferov E.S., Katkov V.P. et al. Vygoranie goryuchego v vodo-vodyanyh energeticheskikh reaktorah i eksperimenty s uran-vodnoj reshetkoj [Fuel Burnup in Pressurized Water Power Reactors and Experiments with a Uranium–Water Lattice]. URL:http://elib.biblioatom.ru/text/doklady-zheneva-1958_t2_yadernye-reaktory_1959/go,412/ (accessed: 27.07.2022) (in Russian)/
- [8] Vasutin N.A., Tashlykov O.L. Reshenie problem pri ispol'zovanii generatora vesovyh okon raschetnogo koda na osnove metoda Monte-Karlo [Solving Problems Using the Weight Window Generator of the Calculation Code Based on Monte-Carlo Method]. Trudy tret'ej nauchno-tehnicheskoy konferencii molodyh uchenyh Ural'skogo energeticheskogo instituta [Proceedings of the Third Scientific and Technical Conference of Young Scientists of the Ural Energy Institute]. Ekaterinburg: UrFU [Ural Federal University]. 2018. P. 329-332. (in Russian)
- [9] Zuev A.A. Analiz primeneniya aksial'nogo profilirovaniya tveg [Analysis of fuel rods axial profiling application]. Materialy 16-j nauchno-tehnicheskoy konferencii molodyh specialistov OKB «GIDROPRESS», 26-27 marta 2014 g.[Proceedings of the 16th Scientific and Technical Conference of Young Specialists of OKB GIDROPRESS, 26-27 March 2014]. Podolsk, 2014 URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2014/documents/kms2014-005.pdf> (accessed: 07/12/2022) (in Russian)
- [10] Savander V.I., Shumsky B.E., Pinegin A.A. Aksial'noe profilirovanie polya energovydeleniya dlya minimizacii ob'yomnoj doli para na vyhode iz TVS VVER-1200[Axial Profiling of the Energy Release Field to Minimize the Volume Fraction of Steam at the VVER-1200 FA Outlet]. Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernyh reaktorov [Issues of Atomic Science and Technology. Series: Physics of Nuclear Reactors]. №2. 2015. – URL: <https://davaiknam.ru/text/aksialnoe-profilirovanie-v-tvs-vver-1200-dlya-minimizacii-obe> (accessed: 07/12/2022) (in Russian)
- [11] Patent RU 2001 127 049 A MPK G21C 3/326. Sposob snizheniya neravnomernosti raspredeleniya teplotekhnicheskikh zasposov v teplovdyel'ayushchih sborkah aktivnoj zony yadernogo reaktora: zayavitel' i patentoobladatel' Otkrytoe akcionernoe obshchestvo «Novosibirskij zavod himkoncentratov», Opytnoe konstruktorskoe byuro «Gidropress». – № 2001127049/06 ; zayavl. 10.04.2001 ; opubl. 20.12.2003 [Patent RU 2001 127 049 A IPC G21C 3/326. A Method of Reducing the Uneven Distribution of Thermal Reserves in the Fuel Assemblies of the of a Nuclear Reactor Core: the Applicant and Patent Holder – Open Joint Stock Company "Novosibirsk Plant of Chemical Concentrates", Experimental Design Bureau "Gidropress". – No. 2001127049/06; dec.

- 04/10/2001; publ. 20.12.2003], Ponomarenko G.L., Vasilchenko I.N., Gorokhov A.K., Kobelev S.N., Naumov V.I., Enin A.A., Kushmanov A.I., Chapaev I.G. – URL: <https://www.freepatent.ru/patents/2219600> (accessed: 07/26/2022) (in Russian)
- [12] Kolesov V.F. Istoki netochnostej v reaktivnosti, opredelyaemoj s pomoshch'yu obrashchennogo resheniya uravnenij kinetiki [Sources of Inaccuracies in Reactivity, Determined Using the Inverted Solution of the Kinetics Equations]. // Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernyh reaktorov [Issues of Atomic Science and Technology. Series: Physics of Nuclear Reactors]. 2013. № 3. P. 30-45 (in Russian).

Comparative Analysis of Methods of Axial Profiling of WWER-1200 Fuel Assembly on Model Z49A2 Example

© **Eduard A. Gerdt¹, Ruslan A. Vnukov²**

^{1,2}*Obninsk Institute of Atomic Energy the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Obninsk, Kaluga region, Russia*

¹*eduard_gerdt@mail.ru, ORCID iD: 0000-0001-7771-0244*

²*ravnukov@oiate.ru*

Abstract. Researches are done to improve parameters of nuclear reactors and reduce the cost of generated electricity directed towards determining of the most rational fuel usage. Different methods use different mathematical and physical models that results in some differences in received data. One of the methods is profiling of Nuclear Energy Reactors. In this paper the theory that is used in modeling and tallies in Serpent 2 is given, the methods of axial profiling of reactors are shown, comparison of received data and justification of their validity on intermediate state of the research are examined.

Keywords: profiling, analysis, Serpent 2, Monte-Carlo method, burning, neutron flow, mathematical modeling, Fuel Assembly, reactor, burnable absorber.

For citation: Gerdt E. A., Vnukov R. A. Comparative Analysis of Methods of Axial Profiling of WWER-1200 Fuel Assembly on Model Z49A2 Example// Global Nuclear Safety. 2022. Vol. 3(44). – P. 65-72. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-03-06>

**КУЛЬТУРА БЕЗОПАСНОСТИ И
СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ РАЗМЕЩЕНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**
SAFETY CULTURE AND SOCIO-ECONOMIC ASPECTS
DEVELOPMENT OF PLACEMENT TERRITORIES
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 621.039:378.6:001.895
doi: 10.26583/gns-2022-03-07

**ИННОВАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОФОРИЕНТАЦИОННОЙ
КООПЕРАЦИИ СТЕЙКХОЛДЕРОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
НА БАЗЕ ВОЛГОДОНСКОГО ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА – ФИЛИАЛА НАЦИОНАЛЬНОГО
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА «МИФИ»**

© 2022 Руденко Валентина Анатольевна¹, Томилин Сергей Алексеевич²,
Железнякова Анжелика Викторовна³, Лобковская Надежда Ивановна⁴

^{1,2,3,4}Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

⁴Московский инновационный университет, Малая Ордынка, д. 7, Москва, Россия

¹VARudenko@mephi.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6698-5469>,

²SATomilin@mephi.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8661-8386>,

³AVZheleznyakova@mephi.ru

⁴nadezhda-lobkovskaya@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0297-5800>

Аннотация. В работе проводится обзор возможностей профориентационной кооперации стейкхолдеров образовательного процесса и специалистов атомной отрасли с целью углубления интеграции школы, технического университета и производства. Предложена модель коллаборации главных заинтересованных субъектов по построению эффективной системы социального партнерства в сфере профессионального образования и повышению качества подготовки выпускников для атомной отрасли.

Ключевые слова: профориентационная кооперация, стейкхолдеры атомной отрасли, инновационная модель, атомный технопарк.

Для цитирования: Руденко В.А., Томилин С.А., Железнякова А.В., Лобковская Н.И. Инновационная модель профориентационной кооперации стейкхолдеров атомной отрасли на базе ВИТИ НИЯУ МИФИ // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 3(44). – С. 73–85. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-03-07>

Поступила в редакцию 21.03.2022

После доработки 09.06.2022

Принята к печати 20.06.2022

Город Волгодонск – территория расположения предприятий сразу четырех дивизионов Госкорпорации «Росатом» (электроэнергетического, машиностроительного, инжинирингового и дивизиона консолидации ветроэнергетических активов), предприятий Волгодонского промышленного кластера атомного машиностроения и Волгодонского инженерно-технического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (далее – ВИТИ НИЯУ МИФИ, институт) – обоснованное и перспективное место специализированного взаимодействия стейкхолдеров атомной отрасли (рис. 1) [1].

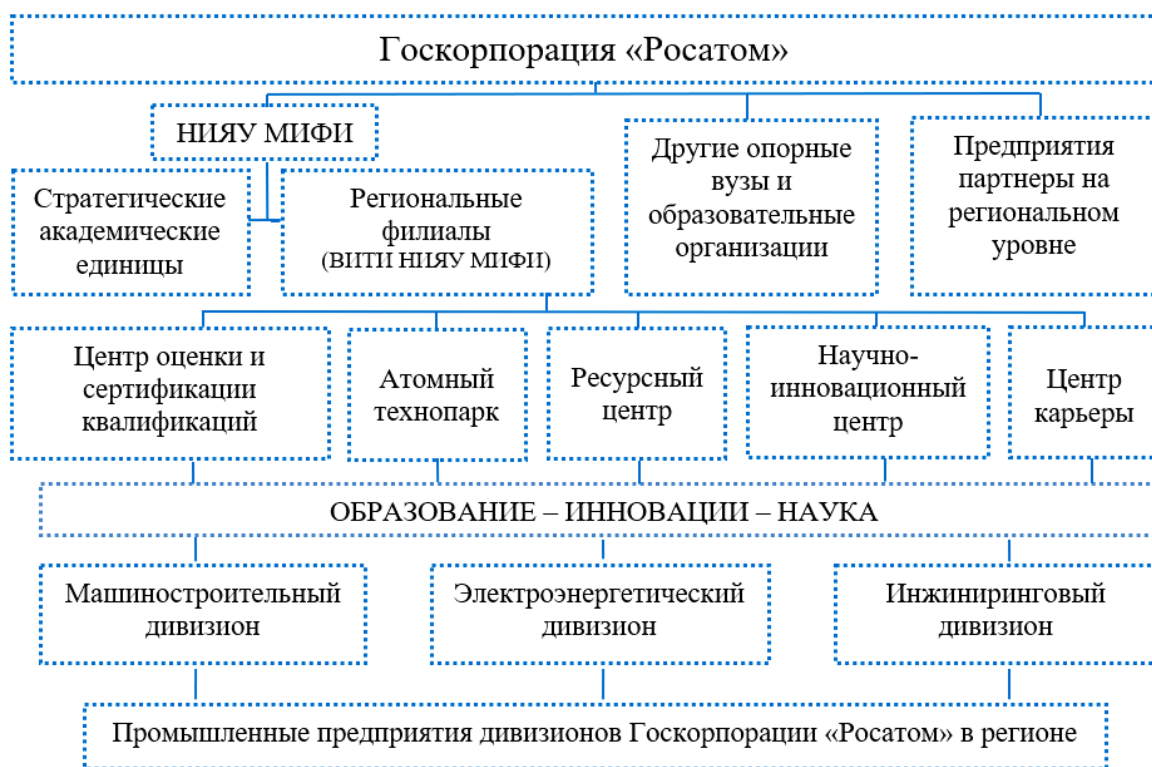


Рисунок 1 – Связи основных стейкхолдеров атомной отрасли [Relationships of the nuclear industry main stakeholders]

При поддержке АО «Концерн Росэнергоатом» и Ростовской АЭС 1 октября 2022 г. на базе ВИТИ НИЯУ МИФИ запущена практикоориентированная платформа профессиональной интеграции в области атомной энергетики – Атомный технопарк (рис. 2).



Рисунок 2 – Открытие Атомного технопарка на базе ВИТИ НИЯУ МИФИ в г. Волгодонск [Opening of the Nuclear Technopark on the basis of VITI NRNU MEPhI in Volgodonk]

Введены в работу высокотехнологичные специализированные площадки Атомного технопарка: Лаборатория неразрушающих методов и средств контроля оборудования АЭС, Центр диагностики и ремонта технологического оборудования АЭС, Цифровой исследовательский полигон виртуальных систем управления и эксплуатации АЭС, Атомный IT-акселератор, Робототехнический и электротехнический клуб, Естествоиспытательный полигон (рис. 3).



Рисунок 3 – Высотехнологичные специализированные площадки Атомного технопарка ВИТИ НИЯУ МИФИ [High-tech specialized sites of the VITI NRNU MEPhI Nuclear Technopark]

Главным направлением становления и развития Атомного технопарка утверждена профориентационная кооперация увлеченных школьников, выполняющих практико-ориентированные научно-исследовательские проекты инженерного характера, студентов ВИТИ НИЯУ МИФИ с развитым профессиональным целеполаганием [2] и специалистов-практиков атомной отрасли с целью формирования мультиинженерных компетенций будущего и корпоративных ценностных ориентиров [3]. Опережающие способы деятельности базируются на специальных знаниях, навыках, владении современными технологиями, а также предполагают «надпрофессиональные умения, которые, безусловно, входят в обязательный компетентностный профиль современного инженера» [4]. Школьникам на этапе выбора важно глубже разобраться в инженерных профессиях, что поможет более осознанно планировать дальнейшее образование. Студентам необходимо закреплять профессиональные навыки под руководством ведущих преподавателей ВИТИ НИЯУ МИФИ и научных работников структурного подразделения института – НИИ «Атомного энергетического машиностроения». Сотрудникам предприятий атомной отрасли будет интересна роль наставников в процессе сотрудничества с одаренной молодежью с целью передачи ценного профессионального опыта, эффективной профессиональной интеграции поколений, поддержания и повышения собственной профессиональной формы. В связи с этим, первым масштабным мероприятием Атомного технопарка стала инженерная смена «Юниоры AtomSkills» со множественными целевыми уровнями (рис. 4).

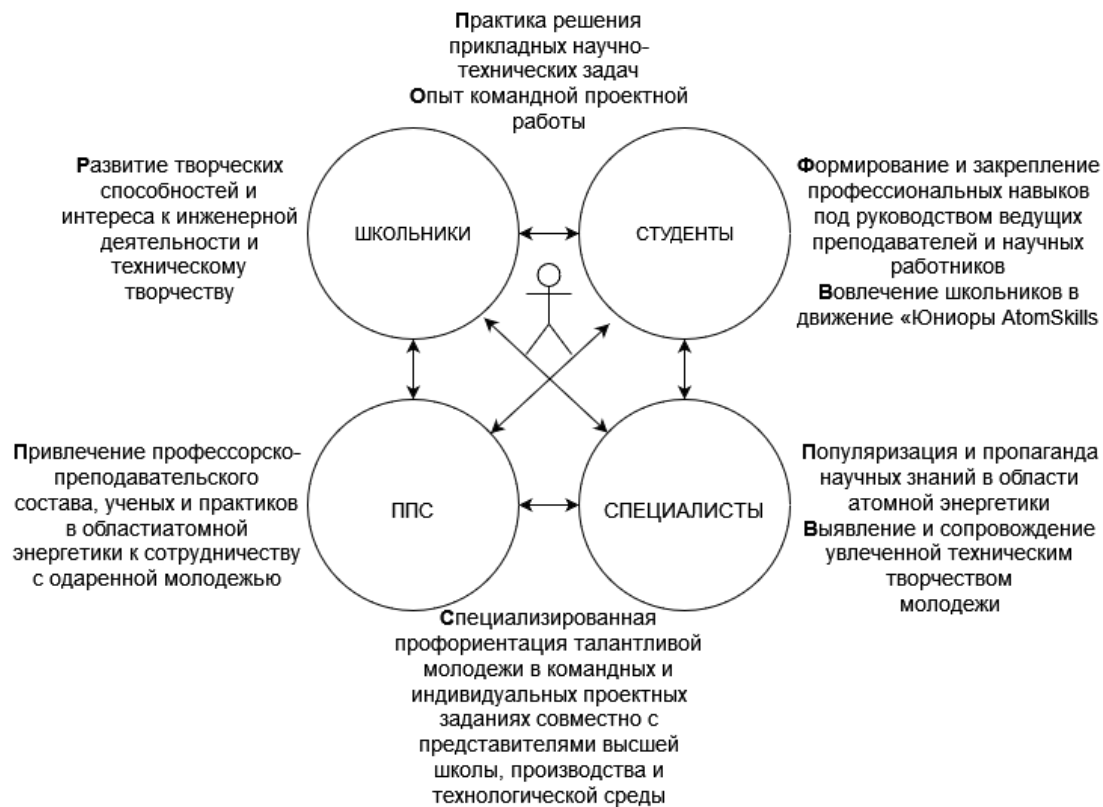


Рисунок 4 – Целевые направления работы Инженерной смены «Юниоры AtomSkills» Атомного технопарка ВИТИ НИЯУ МИФИ [Target areas of work of the «AtomSkills Juniors» Engineering Shift of the VITI NRNU MEPhI Nuclear Technopark]

Программа инженерной смены «Юниоры AtomSkills» разработана и реализована совместно с АО «Концерн Росэнергоатом», АНО «Корпоративная Академия Росатома» и МБУДО «Станция юных техников» в г. Волгодонск по пяти направлениям инженерной деятельности, соответствующим актуальным в атомной отрасли компетенциям (табл. 1) [5]; согласована с предприятиями-партнерами – филиалом АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция» и «Волгодонскатомэнергоремонт» – филиалом АО «Атомэнергоремонт».

Таблица 1 – Компетенции и задания Первой Инженерной смены Атомного технопарка ВИТИ НИЯУ МИФИ [Competences and tasks of the First Engineering Shift of the VITI NRNU MEPhI Nuclear Technopark]

Технологические системы энергетических объектов	Инженерное мышление. Каракури	Web -дизайн и разработка	3D-моделирование и прототипирование	Охрана труда и культура безопасности (сквозная компетенция)
Индивидуальные и коллективные задания				
Кейс «Разработка технологической системы АЭС» (разработка фрагмента системы промежуточного контура АЭС)	Проект «Изготовление макета устройства Каракури» (по критериям и в соответствии с заданием)	Кейс «Создание макета сайта для Информационного центра РоАЭС»	Проект «3D-моделирование элементов стенда для испытания приборов обнаружения утечек в трубопроводах»	Интерактивная игра
- предусмотреть два теплообменника	- рассмотреть базовые механизмы для разработки устройств Каракури, ознакомиться с материалами, комплектующими и инструментами, для создания будущего устройства	- ознакомиться с инструментами программ Adobe Photoshop и WordPress	- изучить основные инструменты для создания эскизов архитектурных объектов программы Blender	- научиться идентифицировать опасности и риски в повседневной жизни и будущей профессиональной деятельности

Продолжение таблицы 1

- присвоить уникальную маркировку каждой единице оборудования	- провести мозговой штурм и выбрать наиболее удачную идею будущего устройства, проработать основные стыковочные узлы и механизмы будущего устройства	- проработать структуру, функционал, дизайн сайта, создать эскизы страниц сайта	- изучить основные инструменты для создания эскизов и моделей программы OnShape	- актуализировать информацию в сигналах и знаках безопасности
- спроектировать систему охлаждения воды промежуточной контура технической водой	- подготовить элементы устройства и произвести распиловку материалов, шлифовку и обработку детали устройства, подготовит элементы к сборке	- создать макет сайта: работа с графическим редактором, системами управления контентом	- подготовить модели к печати на 3D-принтере с использованием PLA-пластика	- определить и выбрать методов предотвращения опасностей в работе
- составить схему соединения теплообменников трубопроводами, арматурой, датчиками	- выполнить подгонку деталей, сборку конструкций и элементов между собой; произвести установку механических связей; провести контрольные испытания механизмов устройства.	- апробировать разработанный сайт, выявить отклонения и ошибки, доработать сайт	- решить задачи по теме «Тела вращения» (смоделировать шахматные фигуры)	- ознакомиться с основными видами инструктажей, описать вопросы и содержание каждого
- предусмотреть автоматический переход с одного теплообменника на другой, отсечение одного или группы теплообменников на ремонт, автоматическое регулирование технической воды	- провести анализ выполненных работ, рассмотреть проблемные точки, изменить и доработать устройство; провести испытание устройств; подготовиться к демонстрации устройств перед экспертами	- подготовиться к представлению проекта перед экспертами	- напечатать 13 моделей, созданных в предыдущие дни (тренировочный этап)	- составить алгоритм правильных действий в критических ситуациях
- учесть контролируемые параметры: t воды промконтура на выходе из каждого теплообменника (на щит), давление в корпусе каждого теплообменника (по месту и на щит), давление в линии подачи технической воды (на щит)	- произвести завершающую подгонку элементов устройства и контрольные испытания; разработать инструкцию к устройству, схему устройства, спецификацию используемых материалов	- проверить сайт на соответствие российскому законодательству	- смоделировать и напечатать элементы стенда для испытания приборов обнаружения утечек в трубопроводах	- представить конструктор опыта по компетенции «Охрана труда и культура безопасности»
Критерии оценки				
Посещение обязательных занятий	Эффективность устройства Каракури	Дизайн: наличие заданных элементов, баланс элементов и цветовых схем, направленность на функционал сайта, соответствие категории пользователей	Освоение инструментов программ Blender и OnShape	Задание «Знаешь ли ты...» (идентификация сигналов и знаков безопасности и опасности)
Выполнение заданий по рабочей тетради	Оригинальность устройства Каракури			Задание «Зоркий глаз, острый слух» (анализ м/ф о технике безопасности, действиях в ЧС)
Анализ стенда «Гидравлическая петля»	Поэтапная реализация проекта (по заданиям рабочей тетради)	Разработка сайта: верстка элементов, корректное отображение объектов и страниц, корректная работа гиперссылок	Пошаговое выполнение заданий по рабочей тетради	Задания «Анаграмма» (сост.терминов по безопасности и опасностям) и «Слова жизни» (завершить фразы о рисках и безопасности)

Продолжение таблицы 1

Выполнение кейса	Анализ выполненных работ и доработка устройства	Представление: соответствие требованиям, качество доклада и выступления, обоснование актуальности, обоснование способа	Прогресс в 3D-моделировании	Задание «Выполни инструкцию» (составить правильный алгоритм действий в критической ситуации)
Защита кейса	Презентация перед экспертами работы устройства Каракури	достижения поставленной цели с помощью предложенного решения	Защита проекта	Задание «Детективчик» (командная работа, коммуникация, алгоритмизация, критический подход)
Оценка наставников и экспертов	Оценка экспертов	Оценка экспертов	Оценка экспертов	Оценка экспертов

Дополнительный стимул продвижения от цели к цели дает соревновательность проектов и стремление победить. Прозрачность критериев оценивания школьников обеспечивает объективность оценки работы (табл. 2 [5]).

Таблица 2 – Пример распределения баллов конкурсного проекта по компетенции «Разработка технологической системы АЭС» [An example of the distribution of the competitive project points in the «Development of the Technological System competence of Nuclear Power Plants»] [5]

№	Критерий	Стоимость в баллах	Участников	Итого стоимость в баллах	Вид оценки
1	Посещение всех обязательных занятий	5	2	10	Оценка участника индивидуально
2	Выполнение всех заданий по рабочей тетради	5	2	10	Оценка участника индивидуально
3	Анализ стенда «Гидравлическая петля»	20	1	20	Оценка команды
4	Выполнение кейса	35	1	35	Оценка команды
5	Защита кейса	20	1	20	Оценка команды
6	Оценка наставника	5	1	5	Оценка команды

В начале смены проведен опрос 80-ти школьников, набранных в группы по четырем указанным компетенциям, относительно ожиданий от мероприятия. Из шести характеристик («Интересно», «Полезно для профессионального самоопределения», «Познавательно», «Сложно», «Скучно», «Формально») предложено ранжировано выбрать три, которые будут реализованы в ходе Инженерной смены: 1 – точно будет, 2 – скорее всего будет, 3 – возможно будет. Большинство участников сошлись, что точно будет познавательно (1-е место), скорее всего будет полезно для профессионального самоопределения (2-е место), возможно будет интересно (3-е место) и сложно (4-е место), тогда как критические характеристики «Формально» (5-е место) и «Скучно» (6-е место) оказались внизу рейтинга (рис. 5, сектор «Ожидания»). Это позволило зафиксировать оптимистично-позитивный настрой школьников и отсутствие необходимости корректировки разработанной программы вхождения в смену посредством командообразующих тренингов.

По тем же характеристикам в конце Инженерной смены получили следующие результаты: во-первых, обучение точно оказалось полезно для профессионального самоопределения (1-е место), что и запланировано организаторами наиболее значимым ориентиром; во-вторых, было интересно (2-место) и познавательно (3-е место) – необходимый мотивационный фундамент; в-третьих, иногда было сложно (4-е место) –

объяснимо, так как уровень стартовой обученности участников разный. Важно отметить, критические характеристики «Формально» и «Скучно» на завершающем этапе не получили отражения в рейтинге, школьники ни разу не указали на них (рис. 5, сектор «Результат»).

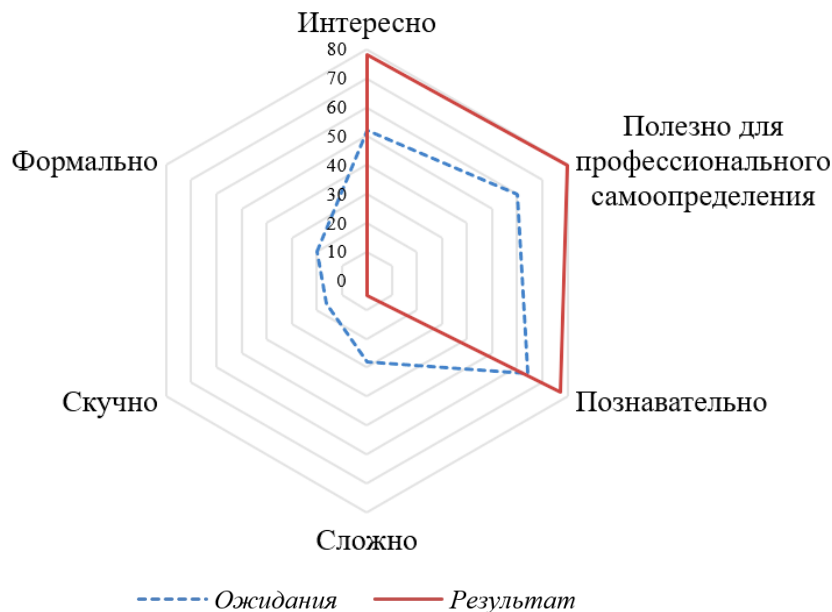


Рисунок 5 – Ожидания школьников от Инженерной смены «Юниоры AtomSkills» и впечатления по завершению обучения [Expectations of schoolchildren of the «AtomSkills Juniors» Engineering Shift and impressions upon completion of training]

Таким образом, обучение в Атомном технопарке ВИТИ НИЯУ МИФИ в рамках Первой Инженерной смены «Юниоры AtomSkills» превзошли ожидания участников, что также было отражено в оценке уровня ее подготовки/проведения и желания продолжить сотрудничество (рис. 6). Школьники оказались наиболее впечатленными участниками – 9 баллов за проведение и 10 баллов за продолжение сотрудничества (по 10-балльной шкале), однако разница в групповых оценках опрошенных ограничивается 1,5-балльным диапазоном, что не является существенным для факторного анализа и позволяет говорить об успешном старте работы Атомного технопарка.

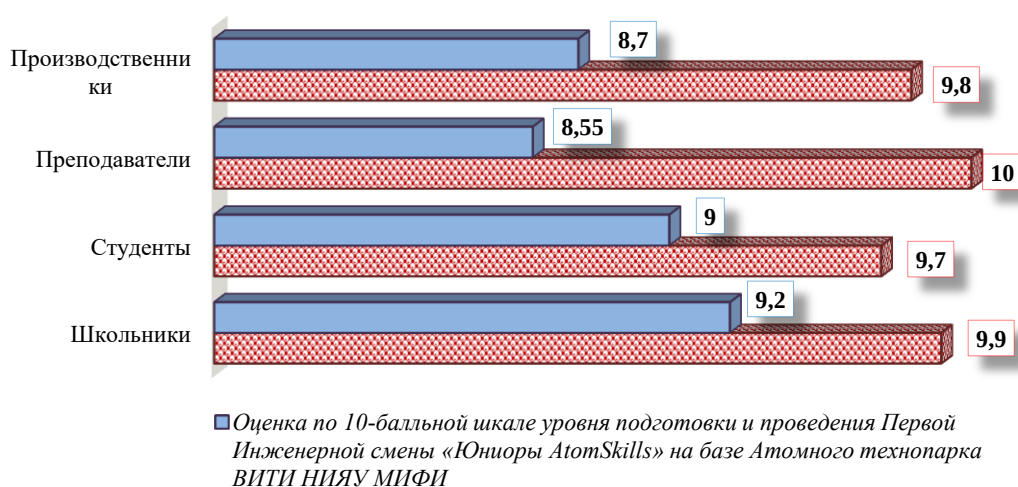


Рисунок 6 – Оценка (по 10-балльной шкале) уровня подготовки и проведения Инженерной смены «Юниоры AtomSkills» на базе Атомного технопарка ВИТИ НИЯУ МИФИ и желания продолжить сотрудничество [Evaluation (on a 10-point scale) of the level of preparation and conduct of the "AtomSkills Juniors" Engineering Shift on the basis of the Atomic Technopark VITI NRNU MEPhI and the desire to continue cooperation]

В качестве рекомендаций по результатам проведения Первой Инженерной смены «Юниоры AtomSkills» на базе Атомного технопарка ВИТИ НИЯУ МИФИ предложено:

- увеличить количество компетенций;
- подключить к реализации проекта предприятия других дивизионов Госкорпорации «Росатом», расположенные на территории г. Волгодонска;
- организовать расширенное итоговое анкетирование школьников с целью выявления их удовлетворенности и разработки программы следующей смены на основе результатов исследования;
- проводить ежегодно по две смены: первую – на летних каникулах (в несколько потоков), вторую – на осенних каникулах;
- предусмотреть возможность подготовки для участников межсменных заданий.

Высокая оценка Инженерной смены всеми группами опрошенных позволяет утвердиться в значимости многоуровневого практикоориентированного сотрудничества. Особенно актуально профориентационное взаимодействие стейкхолдеров атомной отрасли в свете усложнения современного высшего технического образования и ощутимого отставания средней школы в подготовке выпускников с необходимым для дальнейшего успешного обучения базовым уровнем знаний [6]. Кроме того, в институте «учебный процесс основан на более сложной интеллектуальной работе с применением абстрактно-логического анализа как практического, так и теоретического материала» и большой объем самостоятельной работы, что предполагает наличие «устойчивых навыков волевой саморегуляции, мотивационной самодетерминации и самоконтроля». Такого набора качеств порой нет даже у студентов-выпускников, не говоря об абитуриенте или школьнике, а вкуче с проблемами социально-экономической неустроенности, многозадачности и новой системы коммуникации «психологические трудности преодоления собственной ограниченности делают его слабо заинтересованным и, как следствие, слабо успевающим, утратившим остатки профориентационной мотивации и отвергающим вузовские условия и требования» [7]. Следует подчеркнуть, что профессиональные представления, осознанная профориентация, профессиональное самоопределение старших школьников находятся в прямой зависимости от влияния значимых взрослых, особенно наставников, сообщающих молодому поколению ценностное отношение к труду и профессиональной самореализации. Эта миссия требует широкой и основательной подготовки субъектов научно-образовательного сообщества и постоянного совершенствования практик профориентации. [8-13]

Профориентационная работа стейкхолдеров направлена на активную помощь учащимся в преодолении возникающих проблем [14]. Более того, заинтересованные стороны перспективной целью видят формирование ранней приверженности профессии будущего специалиста-атомщика, выбирая наиболее эффективные инструменты взаимодействия, например, профессиональные пробы [15-16], проекты WorldSkills [17], стажировки, командная проектно-исследовательская деятельность, индивидуальные образовательные траектории в проектных практиках [18-19]. Для ВИТИ НИЯУ МИФИ это возможность актуализировать образовательные программы института на основе потребностей главных работодателей промышленного сектора, бизнеса и науки. Кроме того, WorldSkills и некоторые другие инновационные подходы предполагают как состязательную профессиональную коммуникацию, так и взаимодействие экспертов отрасли, региона, университета с целью содержательного наполнения демонстрационного экзамена, опережающей диагностики образовательных и профессиональных траекторий, формирования «мягкой» инфраструктуры вхождения в профессию и создания фундамента профессиональной приверженности.

ВИТИ НИЯУ МИФИ в условиях предоставленных ему полномочий выработал инновационную модель интеграции школы, технического университета и производства (рис. 7). Целью модели выступает ориентация образовательной организации на обеспечение качества выпускников. Результатом созданной модели интеграции

является, с одной стороны, построение эффективной системы социального партнерства в сфере профессионального образования, а с другой – повышение качества подготовки выпускников. Первый – внешний – результат выступает как механизм регулирования социокультурных и экономических вопросов взаимодействия школ, технических университетов, работодателей и государства. Вторым – внутренним – результатом модели является повышение качества подготовки выпускников в рамках единой концепции ВИТИ НИЯУ МИФИ и бизнес-сообщества региона.

В модели определены и представлены компоненты профориентационной коллаборации стейкхолдеров атомной отрасли: образовательный, социокультурный, научно-исследовательский и научно-производственный. Целевой результат такого практического сотрудничества достигается на основе внедрения, как элементов модели, так и системообразующих связей в деятельности ВИТИ НИЯУ МИФИ. Реализация предложенной модели имеет стратегический характер, ярко выраженный в базовых комплексных программах: Концепция комплексного взаимодействия «Школа-Институт-Предприятие», Стратегия развития дополнительного профессионального образования, Программа развития научно-исследовательской деятельности, План социокультурных мероприятий.

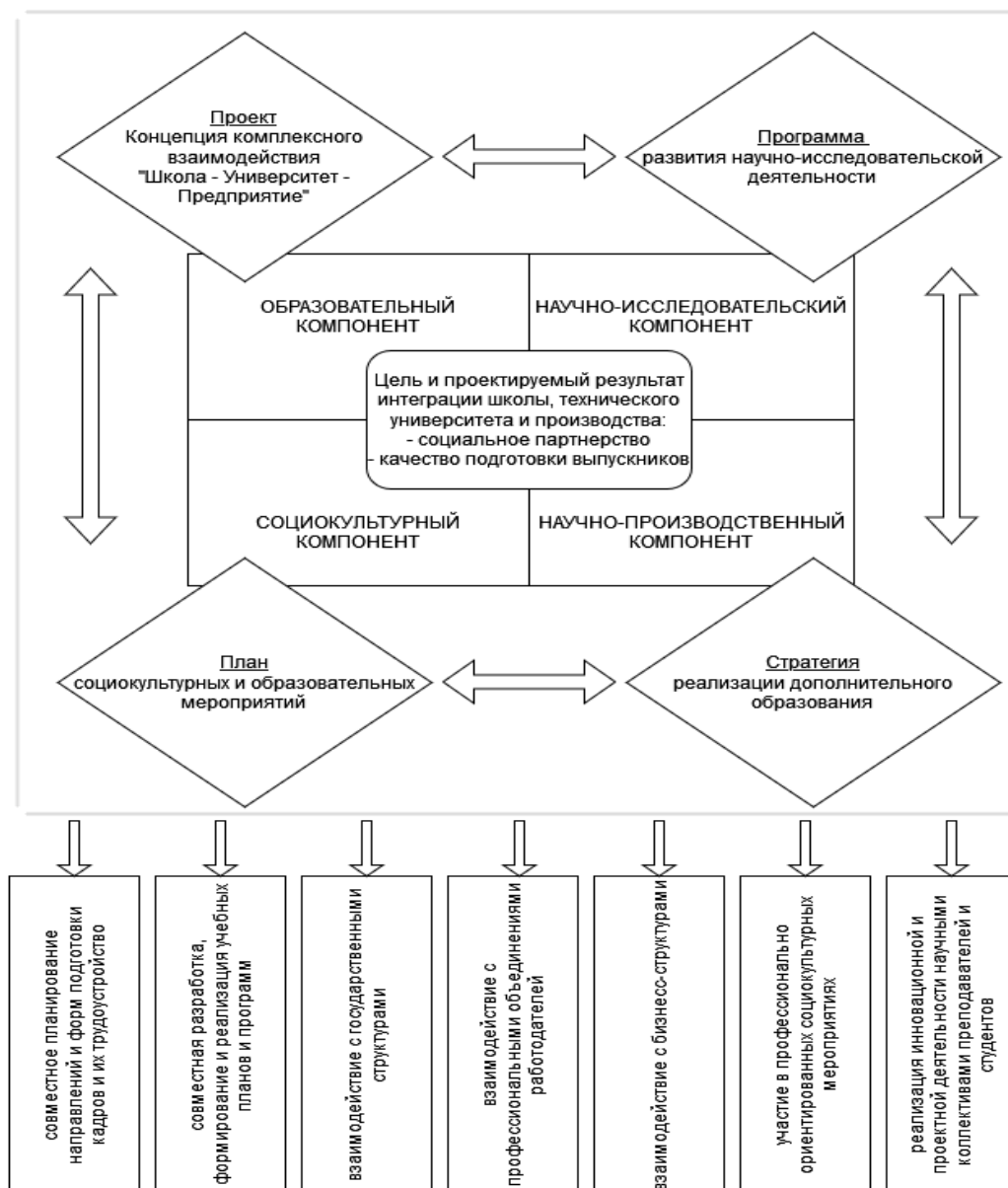


Рисунок 7 – Модель интеграции школы, технического университета и производства [Model of integration of school, technical university and production]

На основе анализа образовательных и производственных профориентационных практик можно утверждать, что предложенная и апробированная модель интеграции школы, технического университета и производства позволяет обеспечивать высокий уровень профессиональной подготовки кадров для атомной отрасли на базе достижения таких значимых результатов как формирование и поддержание «мягкой» инфраструктуры вхождения в профессию, воспитание профессиональной приверженности и следование принципам культуры безопасности при исполнении профессионального долга. Подготовка кадров для атомной и других наукоемких отраслей нуждается в более глубоком внимании заинтересованных субъектов и требует всестороннего многоуровневого профессионального подхода, системного мониторинга и анализа, непрерывного развития в связке с динамичными научно-техническими, производственными, социокультурными внутри – и межпоколенческими изменениями. Обозначенные условия делают исследования профориентационных практик важными и своевременными, тиражирование/применение их результатов позволяет быстро и грамотно реагировать на изменения, организовывать и поддерживать высокоэффективные связи всех стейкхолдеров атомной отрасли в области профориентации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Руденко, В.А. К вопросу об эффективных практиках подготовки кадров для реализации экспортоориентированной стратегии ГК «Росатом» / В.А. Руденко, М.В. Головкин, Ю.А. Евдошкина, Н.П. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 1(30) – С. 124-135.
2. Лобковская, Н.И. Профессиональное целеполагание как составляющая культуры безопасности будущего специалиста-атомщика / Н.И. Лобковская, Ю.А. Евдошкина // Современное образование. – 2017. – № 1. – С. 32-38. – URL : http://e-notabene.ru/pp/article_22498.html (дата обращения: 23.04.2022).
3. Томилин, С.А. Корпоративные ценности как основа формирования профессионального самоопределения студентов при подготовке специалистов для атомной отрасли / С.А. Томилин, Н.П. Василенко, А.В. Железнякова, И.С. Василенко // Педагогика и просвещение. – 2017. – № 1. – С. 31-41.
4. В программы российских вузов включают стандарты WorldSkills : Ректор НИЯУ МИФИ Владимир Шевченко прокомментировал для Минобрнауки роль проекта FutureSkills в опережающей подготовке инженерных кадров (от 07.02.2022). – URL : <https://mephi.ru/press/news/18410>.
5. Отчет о проведении инженерной смены «Юниоры AtomSkills» в рамках приказа АО «Концерн Росэнергоатом» «Об утверждении состава рабочей группы, дорожной карты, сметы затрат и программы для организации и проведения инженерной смены «Юниоры AtomSkills» в г. Волгодонске 25.10.2021 – 30.10.2021» № 9/01/1488-П от 22.09.2021 и реализации проекта «Подготовка рабочих кадров с использованием методики WorldSkills». – URL : <https://viti-mephi.ru/inzhenernaya-smena>.
6. Руденко, В.А. Ранняя профессиональная ориентация в сфере атомной энергетики как фактор стратегического развития атомной отрасли / В.А. Руденко, М.В. Головкин, Н.В. Ермолаева, Н.И. Лобковская // Глобальная ядерная безопасность. – 2018. – № 4(29). – С. 97-108.
7. Лобковская, Н.И. Психолого-педагогические аспекты адаптации первокурсников, получающих высшее образование на базе среднего профессионального / Н.И. Лобковская, С.А. Томилин, Ю.А. Евдошкина // Ученые записки. Электронный научный журнал Курского государственного университета. – 2014. – № 2(30). – С. 141-144.
8. Томилин, С.А. Проблемы формирования профессионального самоопределения с целью повышения качества подготовки специалистов для атомной отрасли / С.А. Томилин, А.В. Железнякова, Н.П. Василенко // Современные технологии в атомной энергетике : Сборник трудов НПК в 3-х томах. – 2016. – С. 169-169а.
9. Завгородняя, А.В. Проблемы и пути осознанной профориентации молодежи и формирования траектории профессионального роста / А.В. Завгородняя, В.Б. Рыбина // Решетневские чтения. Проблемы и пути развития довузовской подготовки молодежи. – 2014. – С. 137-140.
10. Рогов, Е.И. Роль профессиональных представлений в формировании траектории профессионального развития / Е.И. Рогов, Л.Д. Желдоченко // Известия южного федерального университета. Педагогические науки. – 2015. – № 12. – С. 107-112.

11. Трегубова, Т.М. Подготовка субъектов научно-образовательного кластера к профориентационной работе / Т.М. Трегубова, Л.А. Шибанкова // Казанский педагогический журнал. – 2017. – № 6. – С. 52-55.
12. Трегубова, Т.М. Совершенствование практики профориентации обучающихся в научно-образовательном кластере / Т.М. Трегубова, Л.А. Шибанкова, Ю.О. Тигина // Казанский педагогический журнал. – 2018. – № 5. – С. 70-73.
13. Атлас новых профессий 3.0. / Под ред. Д. Варламовой, Д. Судакова. – Москва : Альпина ПРО, 2021. – 472 с.
14. Томилин, С.А. Особенности и проблемы адаптации студентов, обучающихся по программам непрерывного профессионального образования / С.А. Томилин, Г.А. Селезнева, Н.И. Лобковская // В мире научных открытий. – 2013. – № 7-2(43). – С. 146-164.
15. Fukuyama, Sh. F-test for appraising the ability to choose methodically among occupations. – Ashiya, Hyogo, Japan: Ashiya College Press, 1984 (3-d ed.).
16. Белоусов, А.А. Проектирование системы профессиональных проб для школьников / А.А. Белоусов, Г.Н. Некрасова // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2018. – № 10 (октябрь). – С. 85-98. – URL : <http://e-koncept.ru/2018/181075.htm>.
17. Желдаков, О.В. WorldSkills и чемпионаты профессий как факторы активизации профориентации / О.В. Желдаков, С.И. Букреева // Профессиональное образование и рынок труда. – 2015. – № 7. – С. 32.
18. Минакова, П.С. Индивидуальные образовательные траектории студентов в проектной деятельности / П.С. Минакова, В.Б. Колычева, Е.В. Кравченко, О.К. Титова // Азимут научных исследований: педагогика и психология. – 2021. – Т. 10, № 4(37). – С. 160-164.
19. Лунина, Ю.В. Опыт проектно-исследовательской деятельности старшеклассников в системе профориентации / Ю.В. Лунина, С.Н. Саломатова // Азимут научных исследований: педагогика и психология. – 2017. – Т. 6, № 2(19). – С. 89-92.

REFERENCES

- [1] Rudenko V.A., Golovko M.V., Evdoshkina Yu.A., Vasilenko N.P. K voprosu ob effektivnykh praktikakh podgotovki kadrov dlya realizatsii eksportoorientirovannoy strategii GK «Rosatom» [Issue of Effective Training Practices for Implementing the Export-Oriented Strategy of Rosatom]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2019. No 1(30). P. 124-135 (in Russian).
- [2] Lobkovskaya N.I., Evdoshkina Yu.A. Professional'noe celepolaganie kak sostavlyayushchaya kul'tury` bezopasnosti budushhego specialista-atomshhika [Professional Goal-Setting as a Component of the Safety Culture of the Future Nuclear Specialist]. Sovremennoe obrazovanie [Modern Education]. 2017. No 1. P. 32-38. URL: http://e-notabene.ru/pp/article_22498.html – 14.11.2019 (in Russian).
- [3] Tomilin S.A., Vasilenko N.P., Zheleznyakova A.V., Vasilenko I.S. Korporativnyye tsennosti kak osnova formirovaniya professional'nogo samoopredeleniya studentov pri podgotovke spetsialistov dlya atomnoy otrasli [Corporate Values as a Basis for the Formation of Professional Self-Determination of Students in the Training of Specialists for the Nuclear Industry]. Pedagogika i prosveshcheniye [Pedagogy and Education]. 2017. No 1, pp. 31-41 (in Russian).
- [4] V programmy rossiyskikh vuzov vklyuchayut standarty WorldSkills: Rektor NIYAU MIFI Vladimir Shevchenko prokomentiroval dlya Minobrnauki rol' proyekta FutureSkills v operezhayushchey podgotovke inzhenernykh kadrov [WorldSkills Standards are Included in the Programs of Russian Universities: NRNU MEPhI Rector Vladimir Shevchenko Commented for the Ministry of Education and Science on the Role of the FutureSkills Project in Advanced Training of Engineering Personnel]. 07.02.2022. URL : <https://mephi.ru/press/news/18410> (in Russian).
- [5] Otchet o provedenii inzhenernoy smeny «Yuniory AtomSkills» v ramkakh prikaza AO «Kontsern Ros-energoatom» «Ob utverzhdenii sostava rabochey gruppy, dorozhnoy karty, smety zatrat i programmy dlya organizatsii i provedeniya inzhenernoy smeny «Yuniory AtomSkills» v g. Volgodonske 25.10.2021-30.10.2021» № 9/01/1488-P ot 22.09.2021 i realizatsii proyekta «Podgotovka rabochikh kadrov s ispol'zovaniyem metodiki WorldSkills» [Report on the Engineering Shift "AtomSkills Juniors" in the Framework of the Order of Rosenergoatom Concern JSC " Approval of the Composition of the Working Group, Roadmap, Cost Estimate and Program for Organizing and Conducting the Engineering Shift "AtomSkills Juniors" in Volgodonsk 25.10. 2021 – 10/30/2021" No. 9/01/1488-P dated 09/22/2021 and the Implementation of the Project "Training of Workforce Using the WorldSkills methodology"]. URL : <https://viti-mephi.ru/inzhenernaya-smena> (in Russian).
- [6] Rudenko V.A., Golovko M.V., Ermolaeva N.V., Lobkovskaya N.I. Rannaya professional'naya oriyehtatsiya v sfere atomnoy energetiki kak faktor strategicheskogo razvitiya atomnoy 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. No 4(29). P. 97-108 (in Russian).
- [7] Lobkovskaya N.I., Tomilin S.A., Evdoshkina Yu.A. Psikhologo-pedagogicheskiye aspekty adaptatsii pervokursnikov, poluchayushchikh vyssheye obrazovaniye na baze srednego professional'nogo [Psychological and Pedagogical Aspects of the Adaptation of First-Year Students Who Receive Higher Education on the Basis of Secondary Professional Education]. *Uchenyye zapiski. Elektronnyy nauchnyy zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta* [Uchenye zapiski. Electronic Scientific Journal of Kursk State University]. 2014. No 2(30). P. 141-144 (in Russian).
- [8] Tomilin S.A., Zheleznyakova A.V., Vasilenko N.P. Problemy formirovaniya professional'nogo samoopredeleniya s tsel'yu povysheniya kachestva podgotovki spetsialistov dlya atomnoy otrasli [Problems of Formation of Professional Self-Determination in Order to Improve the Quality of Training of Specialists for the Nuclear Industry]. *Sovremennyye tekhnologii v atomnoy energetike : Sbornik trudov NPK v 3-kh tomakh* [Modern Technologies in Nuclear Energy: Collection of Works of the Scientific and Production Complex in 3 volumes]. 2016. P. 169-169a (in Russian).
- [9] Zavgorodnyaya A.V., Rybina V.B. Problemy i puti osoznannoy proforiyentatsii molodezhi i formirovaniya trayektorii professional'nogo rosta [Problems and Ways of Conscious Vocational Guidance of Young People and the Formation of a Trajectory of Professional Growth]. *Reshetnevskie chteniya. Problemy i puti razvitiya dovuzovskoy podgotovki molodezhi* [Reshetnev Readings. Problems and Ways of Development of Pre-University Training of Youth]. 2014. P. 137-140 (in Russian).
- [10] Rogov E.I., Zheldochenko L.D. Rol' professional'nykh predstavleniy v formirovanii trayektorii professional'nogo razvitiya [The Role of Professional Ideas in Shaping the Trajectory of Professional Development]. *Izvestiya yuzhnogo federal'nogo universiteta. Pedagogicheskiye nauki* [Bulletin of the Southern Federal University. Pedagogical Sciences]. 2015. No 12. P. 107-112 (in Russian).
- [11] Tregubova T.M., Shibankova L.A. Podgotovka sub'yektov nauchno-obrazovatel'nogo klastera k proforiyentatsionnoy rabote [Preparation of Subjects of the Scientific and Educational Cluster for Career Guidance]. *Kazanskiy pedagogicheskiy zhurnal* [Kazan Pedagogical Journal]. 2017. No 6. P. 52-55 (in Russian).
- [12] Tregubova T.M., Shibankova L.A., Tighina Yu.O. Sovershenstvovaniye praktiki proforiyentatsii obuchayushchikhsya v nauchno-obrazovatel'nom klasterе [Improving the Practice of Career Guidance for Students in the Scientific and Educational Cluster]. *Kazanskiy pedagogicheskiy zhurnal* [Kazan Pedagogical Journal]. 2018. No 5. P. 70-73 (in Russian).
- [13] Atlas novykh professiy 3.0. [Atlas of New Professions 3.0.]. Ed. D. Varlamova, D. Sudakov. Moskva: Al'pina PRO [Moscow: Alpina PRO]. 2021. 472 p. (in Russian).
- [14] Tomilin S.A., Selezneva G.A., Lobkovskaya N.I., Osobennosti i problemy adaptatsii studentov, obuchayushchikhsya po programmam nepreryvnogo professional'nogo obrazovaniya [Features and Problems of Students Adaptation Enrolled in Continuing Professional Education Programs]. *V mire nauchnykh otkrytiy* [In the World of Scientific Discoveries]. 2013. No 7-2(43). P. 146-164 (in Russian).
- [15] Fukuyama, Sh. F-test for Appraising the Ability to Choose Methodically Among Occupations. – Ashiya, Hyogo, Japan: Ashiya College Press, 1984 (3-d ed.) (in English).
- [16] Belousov A.A., Nekrasova G.N. Proyektirovaniye sistemy professional'nykh prob dlya shkol'nikov [Designing a System of Professional Samples for Schoolchildren]. *Nauchno-metodicheskiy elektronnyy zhurnal «Kontsept»* [Scientific and Methodological Electronic Journal "Concept"]. 2018. N 10 (oktyabr') [2018. No 10 (October)]. P. 85-98. – URL : <http://e-kontsept.ru/2018/181075.htm> (in Russian).
- [17] Zheldakov O.V., Bukreeva S.I. WorldSkills i chempionaty professiy kak faktory aktivizatsii proforiyentatsii [WorldSkills and Professions Championships as Factors for Activating Career Guidance]. *Professional'noye obrazovaniye i rynek truda* [Vocational Education and Labor Market]. 2015. No 7, 32 p. (in Russian).
- [18] Minakova P.S., Kolycheva V.B., Kravchenko E.V., Titova O.K. Individual'nyye obrazovatel'nyye trayektorii studentov v proyektnoy deyatel'nosti [Individual Educational Trajectories of Students in Project Activities]. *Azimut nauchnykh issledovaniy: pedagogika i psikhologiya* [Research Azimuth: Pedagogy and Psychology]. 2021. T. 10, No 4(37), pp. 160-164 (in Russian).
- [19] Lunina Yu.V., Salomatova S.N. Opyt proyektno-issledovatel'skoy deyatel'nosti starsheklassnikov v sisteme proforiyentatsii [Experience of Design and Research Activities of High School Students in the Career Guidance System]. *Azimut nauchnykh issledovaniy: pedagogika i psikhologiya* [Research Azimuth: Pedagogy and Psychology]. 2017. T. 6, No 2(19). P. 89-92 (in Russian).

Innovative Model of Vocational Cooperation of Stakeholders in the Nuclear Industry on the Basis of Volgodonsk Engineering Technical Institute the Branch of National Research Nuclear University «MEPhI»

© Valentina A. Rudenko¹, Sergey A. Tomilin², Anzhelika V. Zheleznyakova³,
Nadezhda I. Lobkovskaya⁴

^{1,2,3,4}*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

⁴*Moscow Innovation University, Malaya Ordynka St., 7, Moscow, Russia 119017*

¹*VARudenko@mephi.ru, ORCID iD: 0000-0002-6698-5469, WoS Researcher ID: B-7730-2016*

²*SATomilin@mephi.ru, ORCID iD: 0000-0001-8661-8386, WoS Researcher ID: G-3465-2017*

³*AVZheleznyakova@mephi.ru*

⁴*nadezhda-lobkovskaya@yandex.ru, ORCID iD: 0000-0002-0297-5800, WoS Researcher ID: O-3879-2018*

Abstract. The paper provides an overview of career guidance cooperation possibilities between the stakeholders of the educational process and nuclear industry specialists in order to deepen the integration of the school, the technical university and production. A model of collaboration of the main stakeholders to build an effective system of social partnership in the field of vocational education and improve the quality of graduate training for the nuclear industry is proposed.

Keywords: career guidance cooperation, nuclear industry stakeholders, innovative model, nuclear technology park.

For citation: Rudenko V.A., Tomilin S.A., Zheleznyakova A.V., Lobkovskaya N.I. Innovative Model of Vocational Cooperation of Stakeholders in the Nuclear Industry on the Basis of Volgodonsk Engineering Technical Institute the Branch of National Research Nuclear University «MEPhI» // Global nuclear safety. 2022. Vol. 3(44). P. 73-85. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-03-07>

**КУЛЬТУРА БЕЗОПАСНОСТИ И
СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ РАЗМЕЩЕНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**
SAFETY CULTURE AND SOCIO-ECONOMIC ASPECTS
DEVELOPMENT OF PLACEMENT TERRITORIES
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 621.039:378.6:331.54

doi: <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-03-08>

**ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ОРГАНИЗАЦИИ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ КАК ДРАЙВЕР РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ
РАСПОЛОЖЕНИЯ АЭС**

© 2022 Привалова Наталия Федоровна¹, Руденко Валентина Анатольевна²,
Бубликова Ирина Альбертовна³

^{1,2,3}Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Россия

¹NFPrivalova@mephi.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6464-188>

²VARudenko@mephi.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6698-5469>

³IABublikova@mephi.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4857-5271>

Аннотация. В работе рассматривается новый подход к формированию моделей развития городов расположения предприятий атомной отрасли, который определяется как инфраструктурно – сервисный, предполагающий не только обеспечение жителей современной инфраструктурой, но и передовыми сервисами, ставит во главу угла максимально эффективное удовлетворение потребностей и запросов человека в городе. Анализируется влияние, которое вузы оказывают на экономику, уровень человеческого капитала и инновационный потенциал территории региона в связи с расширением функций вуза и изменением вектора развития функциональной модели вуза – с универсальной научно-образовательной на экспертно-технологическую. В последние годы в ответ на сложившиеся вызовы в нашей стране происходит трансформация функций вузов, при этом в основных функциях (образовательной и научно-исследовательской) выделяется функция служения региональному сообществу, в рамках реализации которой вуз выступает как драйвер развития территории. Раскрываются направления и формы деятельности Волгодонского инженерно-технического института как драйвера развития г. Волгодонска и Волгодонской агломерации как территории расположения Ростовской АЭС.

Ключевые слова: атомная промышленность, атомная энергетика, АЭС, территория расположения АЭС, социально-экономическое развитие, драйвер развития, социальные субъекты, инфраструктурные проекты, инфраструктурно-сервисный подход, образовательная организация, образовательный процесс, функции вуза, модели развития вуза.

Для цитирования: Руденко В.А., Привалова Н.Ф., Бубликова И.А. Образовательные организации высшего образования как драйвер развития территорий расположения АЭС// Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 3(44). – С. 86-98. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-03-07>

Поступила в редакцию 14.06.2022

После доработки 15.08.2022

Принята к печати 29.08.2022

Развитие гражданского сектора атомной промышленности сформировало особый тип городов, социальное развитие которых существенно зависит от деятельности предприятий атомной отрасли. В настоящее время в России одиннадцать действующих атомных электростанций (далее-АЭС), при каждой из которых существует город-спутник, город – имеющий стратегическое значение. АЭС как высокотехнологичный промышленный объект оказывает значительное влияние на социально-экономическое развитие территории расположения предприятия.

Однако, социально-экономические аспекты функционирования АЭС (и атомного строительства) долгое время находилась вне поля внимания общественных наук, поэтому социальная роль «атомных сегментов» в действующих и недействующих атомградах до настоящего периода остаётся малоизученной. [1].

В работах, направленных на изучение и анализ развития городов размещения предприятий атомной промышленности, чаще всего рассматриваются закрытые административно-территориальные образования (ЗАО) – города атомной промышленности оборонного комплекса и гораздо меньше работ посвящено городам атомной энергетики [2]. Это исследования Заусаевой Я. Д., Лазаренко В. А., Коноваловой Т. А., Замятиной Н., Пилясова А. и др. [1-4].

Сложившаяся ситуация требует всестороннего анализа всего комплекса территориальных проблем атомной энергетики в связи с тем, что выбор стратегии её развития рассматривается сегодня не только с точки зрения энергетического обеспечения экономики, а в комплексе с социально-экономическими, социально-политическими и экологическими процессами.

Переход к новой модели развития обусловлен глобальным контекстом смены технологических укладов и движущих сил экономики. Несмотря на то, что промышленное производство сохраняет важную роль в экономике, из центрального элемента оно становится одним из элементов системы наряду с местной институциональной, культурной, предпринимательской, исследовательской и образовательной инфраструктурой [4].

В связи с этим актуализируется проблема поиска компромиссов между интересами Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» и городскими муниципалитетами, определение подходов и необходимой системы мер, направленных на развитие города, активизацию сетевого взаимодействия муниципальной инфраструктуры и системы, в первую очередь, высшего образования.

При определении драйверов социально-экономического развития городов необходим системный подход. При таком подходе следует относиться к городам как объектам, каждый из которых имеет свои специфические особенности [2].

Набор конкретных мер для каждого города должен быть индивидуальным и определяться в тесном взаимодействии с локальными сообществами, представителями власти и общественных объединений, предпринимателями. Меры, применимые к относительно стабильно развивающимся городам, можно разделить на несколько направлений: улучшение городской инфраструктуры; развитие местной политической системы и сетевых форм взаимодействия в местном сообществе; поддержка институтов знания; диверсификация местной производственной системы [4].

В качестве одного из факторов, способствующих решению проблемы, можно рассматривать деятельность созданного в 2013 г. Фонда содействия развитию муниципальных образований «Ассоциации территорий расположения атомных электростанций» (далее – Фонд «АТР АЭС»). Деятельность ассоциации направлена на вовлечение общественных организаций и местных органов власти в совместную деятельность по формированию позитивного социально-экономического климата, а также повышению уровня социально-экономического и инфраструктурного развития территорий расположения атомных станций.

Однако в сложившейся социально-политической, экономической, технологической ситуации необходимо формировать новый подход к управлению пристанционными территориями, чтобы привлечь в города атомной энергетики с высоким научным и технологическим потенциалом высококвалифицированных специалистов, необходимые ресурсы и решить задачу, поставленную Президентом России – обеспечить технологический суверенитет и технологическое лидерство страны. Это, несомненно, новый подход к формированию моделей развития «атомных» городов, который определен как инфраструктурно-сервисный [5].

Инфраструктурно-сервисный подход предполагает не только обеспечение жителей современной инфраструктурой, но и передовыми сервисами, ставит во главу угла максимально эффективное удовлетворение потребностей и запросов человека в городе. Агентство стратегических инициатив (далее-АСИ) и Госкорпорация «Росатом» ведут работу по созданию инфраструктурно-сервисной модели развития городов присутствия Госкорпорация «Росатом» [6].

В рамках проектно-образовательного интенсива 14 июля 2022 г. в г. Севастополе прошел VI Форум городов с высоким научно-технологическим потенциалом, в котором приняли участие главы территорий расположения АЭС, представители атомных станций, Департамента по взаимодействию с регионами Концерна «Росэнергоатом» и эксперты Фонда «АТР АЭС». В фокусе внимания прошедшего Форума стали малые города, имеющие стратегическое значение для развития страны, среди которых Атомграды [5].

Направления работы Форума:

- определение критериев, по которым города нашей страны могут быть названы городами с высоким научно-техническим потенциалом;
- составлению набора сервисов, которые позволят повысить статус города и привлечь квалифицированные кадры.

Планируется продолжение работы над вопросами формирования рассматриваемого подхода в рамках деятельности комиссии Госсовета, а итоги VI Форума городов могут стать материалом для анализа, обсуждения и создания программ по развитию территорий расположения АЭС [5].

Под воздействием внешних и внутренних вызовов актуализировалась необходимость выстраивания новых отношений, отражающих текущие и перспективные формы и способы взаимодействий социальных субъектов на территориях региона. Статус каждого из таких субъектов определяется наличием ресурсов потенциального влияния и реального воздействия на сообщество территории региона. Одним из ведущих субъектов взаимодействия выступают организации высшего образования [7].

Современные требования к образовательным организациям высшего образования значительно расширяют их функциональную роль в общественном развитии.

Новые показатели эффективности деятельности образовательных организаций высшего образования, новые принципы проведения аккредитационной экспертизы, курс на общественно-профессиональную и международную аккредитацию, динамика спроса на мировом рынке образовательных услуг указывает на новый вектор изменения функциональной модели развития вуза: с универсальной научно-образовательной на экспертно-технологическую [7].

Таким образом, к классической образовательной и научно-исследовательской функциям вузов, которые традиционно являются основными, добавилась функция служения региональному сообществу, которую нередко определяют как «третью роль» или «third mission» в терминах Организации экономического сотрудничества и развития. Это влияние, которое вузы оказывают на экономику, уровень человеческого капитала и инновационный потенциал территории региона [8].

Это приращение функций связано с включением вуза в решение вопросов социально-экономического развития региона и приводит к возрастанию его роли в развитии системы взаимодействия социальных субъектов на территориях расположения атомных электростанций. Вуз в рамках реализации данной функции выступает как драйвер развития территории.

Направления и формы деятельности организаций высшего образования как драйвера социально-экономического развития города, региона рассматриваются в исследованиях Грабельных Т. И., Лесниковской Е. В., Кулешова В. В., Унтура Г. А., Марковой В. Д., Мукина В. А., Ефремова О. Ю., Улановой Г. В., Чернышевой Т. Л. и др. [7-11]

В качестве объекта настоящего исследования выступает территория расположения Ростовской АЭС: г. Волгодонск и Волгодонская агломерация. Предмет исследования – Волгодонский инженерно-технический институт, рассматриваемый как драйвер развития территории расположения Ростовской АЭС.

Волгодонский инженерно-технический институт (далее – ВИТИ НИЯУ МИФИ) при определении задач и направлений Стратегии своего развития в качестве отдельного направления выделяет задачи, связанные с реализацией комплекса мероприятий и направлений деятельности, способствующих социально-экономическому развитию г. Волгодонска, Волгодонской агломерации и региона.

Город Волгодонск, расположенный в восточной части Донского региона, является образовательным центром, как минимум тринадцати районов Ростовской области, и по праву считается уникальным, претендуя на звание «Атомград XXI века».

Стратегия социально-экономического развития города Волгодонска до 2030 года утверждена решением Волгодонской городской Думы от 06.12.2018 №77 «Об утверждении Стратегии социально-экономического развития города Волгодонска до 2030 года». Приоритетными целями реализации Стратегии являются формирование благоприятных условий социально-экономического развития города Волгодонска, воспроизводство и эффективное использование интеллектуального потенциала территории, обеспечивающих повышение уровня и качества жизни населения [12]. В результате реализация Стратегии развития Волгодонск должен стать городом научно-технической интеллигенции.

В истории развития города просматривается несколько этапов, связанных с реализацией масштабных государственных проектов, благодаря которым город включен в мировую экономику. Первый проект – строительство Волгодонского судоходного канала и Цимлянской ГЭС в 1950 г. стал основой возникновения города. Для проживания строителей и эксплуатационного персонала гидроузла был спроектирован рабочий поселок. Но в 1955 г. в поселке началась вторая крупная стройка – сооружение химического комбината. Строительство завода дало толчок к развитию поселка, население стало интенсивно расти, поселок трансформировался в город. Новый этап развития города начался в 1969 г. в Волгодонске со строительством завода тяжелого машиностроения («Атоммаш») для производства оборудования для АЭС. В конце 1970-х годов для обеспечения электроэнергией юга России было принято решение о строительстве АЭС. При выборе площадки основную роль сыграли два основных фактора – крупное водохранилище с большим запасом пресной воды и построенный завод, производящий оборудование для АЭС.

Сегодня Волгодонск является крупным промышленным и энергетическим центром юга России. Это единственный в России город, на территории которого присутствуют предприятия четырех дивизионов Госкорпорации «Росатом»: электроэнергетического (Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция», Ростовский филиал «Ростоватомтехэнерго» АО «Атомтехэнерго», «Волгодонскатомэнергоремонт» – филиал АО «Атомэнергоремонт»), машиностроительного (Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск,

АО «Атомтрубопроводмонтаж»), инжинирингового (Инжиниринговая компания «АСЭ»), нового дивизиона «НоваВинд», основная задача которого – консолидировать усилия Госкорпорации в передовых сегментах и технологических платформах электроэнергетики (совместное российско-голландское предприятие Red Wind B.V. отвечает за поставки ветроустановок «под ключ» и производство компонентов ВЭУ в Волгодонске).

В Волгодонске успешно работают десятки предприятий Территориального союза промышленников и предпринимателей – единственного в области зарегистрированного на федеральном уровне кластера атомного машиностроения, соучредителем которого является и Волгодонский инженерно-технический институт – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Волгодонск является площадкой для обучения иностранных специалистов атомной отрасли. Решение задач осуществляется через развитие Ресурсного центра ГК «Росатом» – НИЯУ МИФИ в г. Волгодонске, который станет драйвером коренных изменений системы подготовки кадров для реализации экспортоориентированной стратегии ГК «Росатом». Ресурсный центр позволил объединить ресурсы расположенных на территории г. Волгодонска предприятий четырех дивизионов ГК «Росатом», Волгодонского промышленного кластера атомного машиностроения, научно-образовательного кластера НИЯУ МИФИ, а также образовательные площадки предприятий атомной отрасли и филиалов НИЯУ МИФИ, расположенных в других регионах России, обеспечить условия высококачественной подготовки специалистов для отечественных и зарубежных АЭС.

Волгодонск – промышленный, образовательный и культурный центр восточной части Ростовской области, географический и торгово-промышленный центр Волгодонской агломерации. Для дальнейшего развития города, как центра восточно-областной агломерации необходимо создать условия для привлечения человеческого и экономического капитала.

Учитывая инновационные возможности ГК «Росатом», город делает ставку на трансфер технологий в городские сервисы и отдельные отрасли экономики. В перспективе планируется развитие ядерной медицины.

Планируется строительство Кампуса с современными лабораториями, что позволит готовить специалистов для промышленности города и зарубежных стран, эксплуатирующих АЭС. Подготовка кадров нового поколения для промышленности планируется через развитие приоритетных направлений в образовании, прежде всего, с ориентацией на науку, математику, инжиниринг, технологии, начиная с дошкольного возраста.

Для реализации программ развития с участием заинтересованных партнеров в городе создан Проектный офис, который осуществляет поиск инвесторов, сопровождает проекты до их реализации. Главная задача проектного офиса как инструмента повышения эффективности работы организации в целом – это достижение стратегических целей и задач.

Внедрение проектного офиса позволит организовать управление по целям, сформировать выверенный портфель проектов, планировать проекты с учетом их значимости и наличия необходимых ресурсов, оперативно перераспределять ресурсы [13].

В рамках развития территории г. Волгодонска и Волгодонской агломерации, одной из главных задач ВИТИ НИЯУ МИФИ, является занятие проактивной позиции в научно-производственной и инновационной сфере на территории муниципального образования.

Участие в реализации поставленной задачи трансформирует институт из позиции исполнителя, реагирующего на запрос, в позицию заказчика на развитие территории,

предлагающего решения и управляющего развитием, становясь активным игроком среди других стейкхолдеров.

Это в перспективе позволит привлечь новых игроков, заинтересованных в развитии как института и системы образования, так и региона, создать новые рабочие места в рамках запуска перспективных проектов, улучшить образ города и перспективы жизни на территории.

ВИТИ НИЯУ МИФИ транслирует на территории региона интересы НИЯУ МИФИ как стратегического партнера ГК «Росатом» в сфере подготовки кадров, являясь подразделением для кадрового обеспечения предприятий электроэнергетического, машиностроительного и инжинирингового дивизионов ГК «Росатом». Институт призван удовлетворять кадровые потребности атомной отрасли, в частности, предприятий ГК «Росатом» на территории региона, а также потребности личности, общества в качественном образовании, знаниях, результатах научно-технической деятельности и инновациях, эффективной подготовке компетентных, отвечающих высоким профессиональным и этическим требованиям, специалистов.

Определены стратегические направления развития ВИТИ НИЯУ МИФИ, выступающего драйвером опережающего социально-культурного развития территории, включая территориальную систему образования:

- консолидация усилий предприятий ГК «Росатом», участников Волгодонского промышленного кластера атомного машиностроения, городских организаций для построения пространства уникальных возможностей жизненно-профессиональной самореализации человека в условиях непрерывного образования;
- создание научно-инновационного центра для развития высокотехнологичных отраслей экономики, техники и технологий, инновационного социально-экономического развития города и региона;
- развитие институтов, обеспечивающих эффективное управление в системе образования, решение проблем кадрового обеспечения образовательной системы путем сохранения и воспроизводства научно-педагогических школ;
- трансформация вуза в «холдинг» для использования его пространства как ресурса саморазвития и профессионального становления;
- формирование привлекательности творческой и исследовательской сфер;
- интеграция ВИТИ НИЯУ МИФИ в городское развитие, участие в создании и развитии единой городской цифровой среды.

Внутри стратегических направлений планируются к запуску программы, на основе наработанных вузом компетенций, что позволит поднять престиж и обеспечить устойчивость вуза, повысить конкурентоспособность разработок и развивать собственный кадровый потенциал. Каждая программа реализуется в рамках стратегической задачи и рассматривается как составляющая и условие опережающего развития.

Однако без развивающейся культуры региона все достижения вуза в виде готовых специалистов, технологий и инноваций будут перетекать в другие развивающиеся культурные центры как внутри страны, так, возможно, и за рубежом. В связи с этим, перед вузом стоит задача формирования основ многообразия в окружающем социальном пространстве, в культуре региона через просветительскую, образовательную и научную деятельность [10].

Особенность взаимодействия социальных субъектов территории региона, как развивающейся инновационной системы, представляет собой непрерывную цепочку, которая начинается с организации процесса подготовки кадров, продолжается в процессе научного поиска, а затем распространяется на опытно-конструкторское и промышленное производство [14].

Взаимодействие ВИТИ НИЯУ МИФИ с территорией в рамках социально-экономического развития осуществляется в различных формах.

Отбор и привлечение талантливой молодежи в атомную отрасль

С целью наращивания интеллектуального капитала города действует система привлечения и поиска талантов, реализация гибких форм привлечения талантов на всех уровнях образования и диверсификация их дальнейших треков развития в процессе обучения в вузе.

В ВИТИ НИЯУ МИФИ создан и работает «Атомный технопарк» – стартовая площадка для решения реальных производственных задач. В «Атомном технопарке», юные инженеры делают первый шаг в профессию. Работа «Атомного технопарка» позволяет выстроить образовательную траекторию «Школа-Атомный технопарк-институт-предприятия Госкорпорации «Росатом». Пройдя весь путь по данной траектории, молодой человек в перспективе может стать специалистом в любой технической области и уже в дальнейшем принимать участие в исследованиях по развитию высокотехнологичных проектов.

Внедряется EdTech в школьное образование. Организовано внеурочное инженерно-техническое образование школьников Волгодонской агломерации: открыт Яндекс-лицей; ежегодно проводятся «AtomCamp» – проектные и инженерные образовательные интенсивы для школьников; работает Летняя научно-техническая школа «Юный атомщик» – летний лагерь для школьников города и региона; организованы лабораторные практикумы и работа на симуляторах VR/AR.

Формирование научно-образовательных коллабораций

Ведется работа по созданию новых исследовательских команд, совместных образовательных и инновационных инфраструктурных проектов с опорными вузами Госкорпорации «Росатом», совместные исследования и проекты с научными организациями.

В качестве ресурсов реализации проекта «Формирование научно-образовательных коллабораций» рассматриваются:

- Ресурсный центр ГК «Росатом» – НИЯУ МИФИ (обучение студентов/магистрантов/ аспирантов; обучение на русском и английском языках; проведение исследований с последующей защитой диссертаций);
- НИИ атомного энергетического машиностроения (внедрение цифровых информационных и ремонтных технологий, а также современных методов и средств оперативной технической диагностики; студенческая лаборатория);
- Международная научно-практическая конференция «Безопасность ядерной энергетики» (обмен опытом и обсуждение актуальных научных вопросов, связанных с обеспечением безопасности АЭС на различных этапах жизненного цикла);
- Журнал «Глобальная ядерная безопасность» (входит в перечень ВАК, издается на русском и английском языках).

По результатам деятельности в рамках научно-образовательных коллабораций формируется система непрерывного инженерно-технического образования высокого качества, основанная на консолидации образовательных, научных и производственных ресурсов, соответствующая потребностям предприятий Госкорпорации «Росатом», г. Волгодонска и других регионов, потребностям цифровой экономики.

Развитие экспертного сообщества региона на площадке вуза

Из числа профессорско-преподавательского состава вуза сформирован пул сертифицированных экспертов по оценке результатов демонстрационных экзаменов, профессиональных экзаменов для системы независимой оценки квалификаций

специалистов, экспертизы деятельности образовательных организаций. Осуществляется привлечение экспертов-работодателей к проведению общественно-профессиональной и международной аккредитации образовательных программ.

Преподаватели вуза приглашаются в качестве экспертов региональных предметных комиссий ЕГЭ и ГИА, а также входят в состав жюри разных конкурсных комиссий.

Кроме того ВИТИ НИЯУ МИФИ может обеспечивать экспертизу наукоемких решений для города, которые разрабатываются вне его стен.

Создание и реализация инновационных инфраструктурных проектов: Центр развития компетенций и Цифровой кампус

Инфраструктурные проекты служат важнейшим фактором регионального развития, оказывают заметное влияние на структурные преобразования и модернизацию регионального хозяйственного комплекса, повышение его конкурентоспособности, уровень жизни населения [15].

Целью проекта «Центр развития компетенций» является профессиональное развитие сотрудников предприятий Госкорпорации «Росатом», Волгодонского промышленного кластера атомного машиностроения, а также преподавателей и студентов ВИТИ НИЯУ МИФИ, «Консорциума опорных вузов Госкорпорации Росатом».

Планируется проведение диагностики уровня освоения профессиональных навыков и компетенций, разработка и реализация моделей компетенций персонала под актуальные и перспективные задачи предприятий Госкорпорации «Росатом» в области атомной энергетики, атомного машиностроения, IT-технологий, требования актуальных российских и мировых стандартов, в том числе, стандартов Worldskills; подготовка участников к российским и зарубежным чемпионатам профессионального мастерства: AtomSkills, Worldskills Hi-Tech, DigitalSkills, разработка и реализация образовательных программ, отвечающих потребностям отрасли, внедрение эффективных инновационных моделей и технологий обучения, включая дистанционные технологии, электронное обучение и создание этой основе системы опережающей подготовки специалистов.

Это позволит обеспечить эффективное взаимодействие со стейкхолдерами дивизионов Госкорпорации «Росатом», Волгодонского промышленного кластера атомного машиностроения и осуществить интеграцию ресурсов для решения широкого круга инновационных производственных задач в условиях диверсификации и развития производства, обеспечить опережающую практико-ориентированную подготовку специалистов в области проектирования, инжиниринга и атомного машиностроения.

Очевидно, что город постепенно превращается в интеллектуальную экосистему – это тенденция уже наступившего будущего. Цифровая трансформация способствует тому, что город будет рассматриваться как компьютерная программа в процессоре данных. Эта программа аккумулирует все основные направления функционирования города, такие как здравоохранение, образование, энергетика, транспорт, водные ресурсы, культура. Следовательно, особой актуальностью обладает разработка различных компьютерных программ, повышающих эффективность того или иного жизненного процесса [11].

Цель проекта предполагает разработку и внедрение цифровых решений, обеспечивающих трансформацию учебных, научных и управленческих процессов, на основе технологий цифровой экономики, обеспечивающих процесс цифровой трансформации института.

Создание цифрового кампуса позволит обеспечить условия и механизмы, которые будут направлены на поддержание ИКТ инфраструктуры, соответствующей современным техническим и технологическим требованиям. Цифровая трансформация

позволит обеспечить повышение качества образовательного процесса и проведения научно-практических исследований, а также повсеместное внедрение практико-ориентированного подхода в обучении, направленного на формирование и развитие цифровых компетенций выпускников и молодых специалистов.

Продвижения технологий независимой оценки квалификаций и сертификаций выпускников

Внедряется механизм демонстрационного экзамена как выпускного по стандартам WorldSkills. Осуществляется взаимодействие и интеграция с профессиональными сообществами, советами по профессиональным квалификациям, центрами оценки квалификаций, отраслевыми кластерами с целью актуализации моделей компетенций и проведения профессионального экзамена в рамках независимой оценки квалификаций и сертификаций будущих специалистов [16].

Интеграция в городское развитие

Реализация проекта планируется по следующим направлениям:

- мониторинг социально-экономического и политического развития города;
- участие в общественных и экспертных советах и органах города и области;
- создание электронной платформы для экспертных сообществ города;
- создание и поддержка коммуникативных площадок «Активный гражданин» по продвижению инициатив населения и инфраструктурных преобразований;
- развитие мероприятий корпоративного волонтерства, направленных на оказание помощи нуждающимся, решение социальных и экологических проблем;
- создание городского штаба ССО на платформе ВИТИ НИЯУ МИФИ с привлечением представителей других образовательных организаций города.

На базе института планируется организовать форум, на котором студенты, сотрудники вуза, представители городских структур, бизнеса и некоммерческих организаций примут участие в обсуждении различных насущных городских проблем, по итогам которого вместе разработают план мероприятий для устойчивого развития города.

Таким образом, институт станет движущей силой развития города. Институт будет решать проблемы города, а город – определять векторы и форматы развития института [11].

Сегодня Госкорпорация «Росатом» стоит на позиции, что города, расположения предприятий атомной отрасли, создававшиеся как уникальные центры, собирающие исключительный человеческий потенциал, должны продолжать своё развитие. Повышение качества образования, совершенствование культурной среды в них позволит с одной стороны сохранить преемственность и традиции, а с другой – привнести новые решения не только в социальную сферу жизнедеятельности городов, но и на предприятия атомной отрасли.

Российские вузы должны стать точками роста регионов и активно участвовать в решении их социально-экономических проблем. Обладая развитой инфраструктурой и кадровым потенциалом, вузы способны быть не только фактором экономического роста регионов, но и стать драйверами их инновационного развития [1].

Включение ВИТИ НИЯУ МИФИ в решение вопросов социально-экономического развития города и региона, реализация инфраструктурных проектов на территории г. Волгодонска позволит получить следующие результаты:

Система образования г. Волгодонска на основе внедрения инновационных образовательных технологий, значительных инфраструктурных и содержательных изменений, новых стратегических ориентиров, проектного управления изменениями

получит новый импульс к развитию, качественному изменению результатов своей деятельности.

Получит новое развитие система привлечения и поиска талантов, на всех уровнях образования и диверсификация их дальнейших треков развития в процессе обучения в вузе, что в итоге будет обеспечивать сохранение и приращение интеллектуального капитала города и территории расположения АЭС.

Будет сформирована система непрерывного инженерно-технического образования высокого качества, основанного на консолидации образовательных, научных и производственных ресурсов, соответствующих потребностям предприятий Госкорпорации «Росатом», г. Волгодонска и других регионов, потребностям цифровой экономики.

Волгодонский инженерно-технический институт станет:

- центром научных исследований и разработок по актуальным направлениям развития и обеспечения эксплуатационной надёжности и безопасности оборудования и систем АЭС и других энергетических объектов;
- центром дополнительного профессионального образования, реализующим программы подготовки и переподготовки кадров для ведущих предприятий города и Волгодонской агломерации;
- драйвером развития социально-культурной жизни города Волгодонска и Волгодонской агломерации, драйвером позитивных изменений городской среды и центральной площадкой реализации значимых социальных проектов на территории расположения АЭС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Заусаева, Я.Д.* Атомные специалисты в структуре местных сообществ городов-спутников АЭС: Итоговый отчет о целевом исследовании пожертвования / Я.Д. Заусаева – Москва : Фонд поддержки социальных исследований «Хамовники», 2015. – 69 с. – URL: <https://khamovniki.ru/wp-content/uploads/6c372f58fd2d1a32f1a00102821c5e0b.pdf> (дата обращения: 03.08.2022).
2. *Лазаренко, В.А.* Социальное развитие городов атомной электроэнергетики России / В.А. Лазаренко // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2019. – № 2. – С. 20-30. – URL: <https://journals.eco-vector.com/2587-5566/article/view/12671>
3. *Коновалова, Т.А.* Повышение эффективности экономического развития моногорода стратегического значения : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Т.А. Коновалова. – Санкт-Петербург, 2013. – 24 с. – URL: <https://www.dissercat.com/content/povyshenie-effektivnosti-ekonomicheskogo-razvitiya-monogoroda-strategicheskogo-znacheniya> (дата обращения: 03.08.2022).
4. *Замятина, Н.* Монопрофильные города России: блокировки и драйверы инновационного поиска / Н. Замятина, А. Пилясов // Форсайт. – 2016. – Т. 10, № 3. – С. 53-64. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/monoprofilnye-goroda-rossii-blokirovki-i-drayvery-innovatsionnogo-poiska> (дата обращения: 03.08.2022).
5. Главы территорий расположения АЭС, представители атомных станций и эксперты Фонда «АТР АЭС» обсудили новые подходы к развитию территорий на VI Форуме городов: новости отрасли – URL: <https://www.rosenergoatom.ru/zhurnalistam/novosti-otrasli/41517/> (дата обращения: 20.07.2022).
6. АСИ и Росатом разрабатывают новый подход к развитию городов // Сайт Агентства стратегических инициатив. – URL: <https://asi.ru/news/186768/> (дата обращения: 03.08.2022).
7. *Грабельных, Т.И.* Роль университета в развитии системы региональных взаимодействий: от универсальной научно-образовательной к экспертно-технологической модели / Т.И. Грабельных, Е.В. Лесникова // Вестник университета. – 2017. – №3. – С. 220-222. – URL: https://vestnik.guu.ru/jour/article/view/665?locale=ru_RU (дата обращения: 02.08.2022).
8. *Уланова, Г.В.* Университет как драйвер экономического и социального развития региона (на примере Республики Калмыкия) / Г.В. Уланова // Новые технологии / New technologies. – 2018. – №1. – URL: <https://newtechnology.mkgtu.ru/jour/article/view/114/114> (дата обращения: 20.07.2022).

9. Кулешов, В.В. Развитие экономики знаний: роль инновационных проектов в программе реиндустриализации региона / В.В. Кулешов, Г.А. Унтура, В.Д. Маркова // Регион: экономика и социология. – 2016. – № 3 (91). – С. 28-54. – URL: https://www.ieie.su/assets/files/sci/region-kuleshov_untura_markova3-16.pdf (дата обращения: 20.07.2022).
10. Мукин, В.А. Концепция оптимизации регионального университета / В.А. Мукин, О.Ю. Ефремов // Современное образование. – 2018. – №1. С. 11-21. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-optimizatsii-regionalnogo-universiteta> (дата обращения: 02.08.2022).
11. Чернышева, Т.Л. Университет как драйвер развития города/ Т.Л. Чернышева // Научно-педагогическое обозрение (Pedagogical Review). – 2017. – № 2. – С. 209-219. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/universitet-kak-drayver-razvitiya-goroda-t-l/viewer> (дата обращения: 02.08.2022).
12. Стратегия социально-экономического развития города Волгодонска до 2030 года // Сайт Администрации города Волгодонска. – URL: <http://volgodonskgorod.ru/investments/strategicheskoe-planirovanie/> (дата обращения: 02.08.2022).
13. Лисицинская, А.В. Проектное управление развитием образовательной организации, как профессиональная компетентность современного руководителя / А.В. Лисицинская // Проблемы современного педагогического образования. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proektnoe-upravlenie-razvitiem-obrazovatelnoy-organizatsii-kak-professionalnaya-kompetentnost-sovremennogo-rukovoditelya> (дата обращения: 20.07.2022).
14. Тузкова, Д.К. Формирование наукограда как базового элемента региональной инновационной системы: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Д.К. Тузкова. – Москва, 2019. – 26 с. – URL: <https://www.dissercat.com/content/formirovanie-naukograda-kak-bazovogo-elementa-regionalnoi-innovatsionnoi-sistemy> (дата обращения: 20.07.2022).
15. Плисецкий, Е.Л. Инфраструктурный потенциал территории как фактор устойчивого регионального развития / Е.Л. Плисецкий, Е.Е. Плисецкий // Вопросы государственного и муниципального управления. – 2020. – № 3. – С. 165-186. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/infrastrukturnyy-potentsial-territorii-kak-faktor-ustoychivogo-regionalnogo-razvitiya> (дата обращения: 20.07.2022).
16. Руденко, В.А. Независимая оценка квалификации будущих специалистов в области атомной энергетики как фактор безопасности атомных станций/ В.А. Руденко, Н.Ф. Привалова // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – №1. – С. 75-88.

REFERENCES

- [1] Zausaeva Ya.D. Atomnye specialisty v strukture mestnyh soobshchestv gorodov-sputnikov AES: Itogovyy otchet o celevom ispol'zovanii pozhtertvovaniya [Nuclear Professionals in the Structure of Local Communities of the NPP Satellite Cities: Final Report on the Intended Use of the Donation]. Moskva: Fond podderzhki social'nyh issledovaniy «Hamovniki» [Moscow: Khamovniki Social Research Support Foundation]. 2015. 69 p. URL: <https://khamovniki.ru/wp-content/uploads/6c372f58fd2d1a32f1a00102821c5e0b.pdf> (accessed: 08/03/2022) (in Russian).
- [2] Lazarenko V.A. Social'noe razvitie gorodov atomnoj elektroenergetiki Rossii [Social Development of Nuclear Power Cities in Russia]. Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya [News of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series]. 2019. №2. P. 20-30. URL: <https://journals.eco-vector.com/2587-5566/article/view/12671> (in Russian).
- [3] Konovalova T.A. Povyshenie effektivnosti ekonomicheskogo razvitiya monogoroda strategicheskogo znacheniya: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata ekonomicheskikh nauk [Improving the Efficiency of Economic Development in a Single-Industry Town of Strategic Importance: PhD thesis abstract in Economics]. St Petersburg, 2013. 24p. URL: <https://www.dissercat.com/content/povyshenie-effektivnosti-ekonomicheskogo-razvitiya-monogoroda-strategicheskogo-znacheniya> (accessed: 08/03/2022) (in Russian).
- [4] Zamyatina N., Pilyasov A. Monoprofil'nye goroda Rossii: blokirovki i drayvery innovacionnogo poiska [Russia's Mono-Cities: Blockages and Drivers of Innovative Search] // Forsajt [Foresight]. 2016. Vol.10, №3. P. 53-64. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/monoprofilnye-goroda-rossii-blokirovki-i-drayvery-innovatsionnogo-poiska> (accessed: 08/03/2022) (in Russian).
- [5] Glavy territorij raspolozheniya AES, predstaviteli atomnyh stancij i eksperty Fonda "ATR AES" obsudili novye podhody k razvitiyu territorij na VI Forume gorodov: novosti otrasli [Heads of NPP Host Territories, Representatives of Nuclear Power Plants and Experts from the NPP Asia-Pacific Foundation Discussed New Approaches to Territorial Development at the VI Urban Forum: Industry

- News] URL: <https://www.rosenergoatom.ru/zhurnalistam/novosti-otrasli/41517/> (accessed: 07/20/2022) (in Russian).
- [6] ASI i Rosatom razrabatyvayut novyy podhod k razvitiyu gorodov [ASI and Rosatom Develop a New Approach to Urban Development]. Sajt Agentstva strategicheskikh iniciativ [Agency for Strategic Initiatives website]. – URL: <https://asi.ru/news/186768/> (reference date: 08/03/2022) (in Russian).
- [7] Grabel'nyh T.I., Lesnikovskaya E.V. Rol' universiteta v razvitii sistemy regional'nyh vzaimodeystviy: ot universal'noj nauchno-obrazovatel'noj k ekspertno-tekhnologicheskoy modeli [University Role in Developing a System of Regional Interactions: from Universal Science-Education to Expert-Technology Model]. Vestnik universiteta. [University Press]. 2017. №3. P. 220-222. URL: https://vestnik.guu.ru/jour/article/view/665?locale=ru_RU (accessed: 02/08/2022) (in Russian).
- [8] Ulanova G.V. Universitet kak drayver ekonomicheskogo i social'nogo razvitiya regiona (na primere Respubliki Kalmykiya) [The University as a Driver of Regional Economic and Social Development (Case Study of the Republic of Kalmykia)]. Novye tekhnologii [New technologies]. 2018. №1. URL: <https://newtechnology.mkgtu.ru/jour/article/view/114/114> (accessed: 07/20/2022) (in Russian).
- [9] Kuleshov V.V., Untura G.A., Markova V.D. Razvitie ekonomiki znaniy: rol' innovatsionnykh proektov v programme reindustrializatsii regiona [Development of Knowledge Economy: the Role of Innovation Projects in the Region's Reindustrialization Programme]. Region: ekonomika i sociologiya [Region: Economics and Sociology]. 2016. № 3 (91). P. 28-54. URL: https://www.ieie.su/assets/files/sci/region-kuleshov_untura_markova3-16.pdf (accessed: 07/20/2022) (in Russian).
- [10] Mukin V.A., Efremov O.Yu. Konceptsiya optimizatsii regional'nogo universiteta [Concept of Regional University Optimisation]. Sovremennoe obrazovanie [Modern Education]. 2018. №1. P. 11-21. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-optimizatsii-regionalnogo-universiteta> (accessed: 08/02/2022) (in Russian).
- [11] Chernysheva T. L. Universitet kak drayver razvitiya goroda [University as a Driver of Urban Development]. Nauchno-pedagogicheskoe obozrenie [Pedagogical Review]. 2017. № 2. P. 209-219. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/universitet-kak-drayver-razvitiya-goroda-t-l/viewer> (accessed: 08/02/2022) (in Russian).
- [12] Strategiya social'no-ekonomicheskogo razvitiya goroda Volgodonska do 2030 goda [Strategy of Socio-Economic Development of Volgodonsk until 2030]. Sajt Administratsii goroda Volgodonska [Website of Volgodonsk City Administration]. – URL: <http://volgodonskgorod.ru/investments/strategicheskoe-planirovanie/> (accessed: 08/02/2022) (in Russian).
- [13] Lisicinskaya A.V. Proektnoe upravlenie razvitiem obrazovatel'noj organizatsii, kak professional'naya kompetentnost' sovremennogo rukovoditelya [Project-based Management of Educational Organisation Development as a Professional Competence of a Modern Manager]. Problemy sovremennogo pedagogicheskogo obrazovaniya [Challenges of Modern Teacher Education]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proektnoe-upravlenie-razvitiem-obrazovatelnoy-organizatsii-kak-professionalnaya-kompetentnost-sovremennogo-rukovoditelya> (accessed: 07/20/2022) (in Russian).
- [14] Tuzkova D. K. Formirovanie naukograda kak bazovogo elementa regional'noj innovatsionnoy sistemy: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata ekonomicheskikh nauk [Formation of a Science City as a Basic Element of a Regional Innovation System: PhD thesis abstract in Economics]. Moscow, 2019. 26 p. URL: <https://www.dissercat.com/content/formirovanie-naukograda-kak-bazovogo-elementa-regionalnoi-innovatsionnoi-sistemy> (accessed: 07/20/2022) (in Russian).
- [15] Pliseckiy E.L., Pliseckiy E.E. Infrastrukturnyy potencial territorii kak faktor ustoychivogo regional'nogo razvitiya [Territorial Infrastructural Potential as a Factor for Sustainable Regional Development]. Voprosy gosudarstvennogo i municipal'nogo upravleniya [State and Municipal Government Issues]. 2020. № 3. P.165-186. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/infrastrukturnyy-potentsial-territorii-kak-faktor-ustoychivogo-regionalnogo-razvitiya> (accessed: 07/20/2022) (in Endlish).
- [16] Rudenko V.A., Privalova N.F. Nezavisimaya ocenka kvalifikatsii budushchih specialistov v oblasti atomnoy energetiki kak faktor bezopasnosti atomnykh stantsiy [Independent Assessment of Future Nuclear Qualifications as a Factor of Nuclear Power Plant Safety]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global nuclear safety]. 2022. №1. P. 75-88 (in Russian).

Educational Institutions of Higher Education as Development Driver of Nuclear Power Plant Areas

Natalia F. Privalova¹, Valentina A. Rudenko², Irina A. Bublikova³

^{1,2,3}*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*
¹*NFPrivalova@mephi.ru, ORCID iD: 0000-0002-6464-188*
²*VARudenko@mephi.ru, ORCID iD: 0000-0002-6698-5469, WoS Researcher ID: B-7730-2016*
³*IABublikova@mephi.ru, ORCID iD: 0000-0002-4857-5271*

Abstract. The paper considers a new approach to the formation of development models of cities of nuclear industry enterprises which is defined as infrastructural-service oriented assuming not only providing residents with modern infrastructure, but also with advanced services, putting the most effective satisfaction of human needs and demands in the city at the forefront. The paper analyzes the impact that universities have on the economy, the level of human capital and innovation potential of the territory of the region in connection with the expansion of university functions and the change in the vector of the functional model of the university – from a universal scientific and educational to an expert-technological one. In recent years, in response to the current challenges in our country, the functions of universities have been transformed, with the main functions (educational and research) emphasizing the function of serving the regional community, in the implementation of which the university acts as a driver of territory development. The article reveals the directions and forms of activities of Volgodonsk Engineering and Technical Institute as a driver of development of Volgodonsk and Volgodonsk agglomeration as a territory of Rostov NPP location.

Keywords: nuclear industry, nuclear power, NPP, NPP site, socio-economic development, development driver, social actors, infrastructure projects, infrastructure-service approach, educational organisation, educational process, university functions, university development models.

For citation: Rudenko V.A., Privalova N.F., Bublikova I.A. Educational Institutions of Higher Education as Development Driver of Nuclear Power Plant Areas // Global nuclear safety. 2022. Vol 3(44). P. 86-98. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-03-07>

AUTHOR INDEX

<i>Abidova E.A.</i>	56
<i>Aleeva T.B.</i>	5
<i>Arkadov G.V.</i>	43
<i>Bogdanova E.V.</i>	5
<i>Bublikova I.A.</i>	86
<i>Gerdt E.A.</i>	65
<i>Gudemenko D.V.</i>	22
<i>Kalashnikov M.V.</i>	30
<i>Kotsoev K.I.</i>	43
<i>Lapkis A.A.</i>	30
<i>Lobkovskaya N.I.</i>	73
<i>Mikshin I.A.</i>	30
<i>Privalova N.F.</i>	86
<i>Pugachev P.A.</i>	5
<i>Pugacheva O.Yu.</i>	56
<i>Rudenko V.A.</i>	73, 86
<i>Ryzhkov A.A.</i>	5
<i>Ryzhov S.N.</i>	5
<i>Salnikova A.A.</i>	22
<i>Ternovykh M.Yu.</i>	5
<i>Tikhomirov G.V.</i>	5
<i>Tomilin S.A.</i>	73
<i>Trykova I.V.</i>	43
<i>Vnukov R.A.</i>	65
<i>Zheleznyakova A.V.</i>	73

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

<i>Абидова Е.А.</i>	56
<i>Алеева Т.Б.</i>	5
<i>Аркадов Г.В.</i>	43
<i>Богданова Е.В.</i>	5
<i>Бубликова И.А.</i>	86
<i>Внуков Р.А.</i>	65
<i>Гердт Э.А.</i>	65
<i>Гудеменко Д.В.</i>	22
<i>Железнякова А.В.</i>	73
<i>Калашников М.В.</i>	30
<i>Коцоев К.И.</i>	43
<i>Лапкис А.А.</i>	30
<i>Лобковская Н.И.</i>	73
<i>Микишин И.А.</i>	30
<i>Привалова Н.Ф.</i>	86
<i>Пугачев П.А.</i>	5
<i>Пугачева О.Ю.</i>	56
<i>Руденко В.А.</i>	73, 86
<i>Рыжков А.А.</i>	5
<i>Рыжов С.Н.</i>	5
<i>Сальникова А.А.</i>	22
<i>Терновых М.Ю.</i>	5
<i>Тихомиров Г.В.</i>	5
<i>Томилин С.А.</i>	73
<i>Трыкова И.В.</i>	43

NOTES FOR AUTHORS

The full text of article intended for publication should be signed by authors, it has to be followed by a certificate of material verification through the anti-plagiarism program (permissible borrowing and self-citation - no more than 20%), an application from the institution in which the work was performed, and an expert resolution on publication possibility.

One file consists of one paper which has the following:

- UDC index;
- the title in Russian and English;
- the structured abstract (200-250 words) in Russian and English;
- 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 and E-mail address, contact phone number);
- 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.

In order to improve the quality and objectivity of publications, the authors are intended to reflect the advanced scientific experience of foreign countries, Russia and the CIS on the subject matter in the articles. The bibliography should be in accordance with State Standard Specification (GOST) 7.0.100-2018 «Bibliographic Record and Bibliographic Description. General Requirements and Drafting rules». References should include at least 12 sources (no more than 3 references to your own articles). There should be obligatory at least 5 sources later than 2016, and at least 4 references to foreign studies of recent years (from foreign countries, outside the former USSR). References are given at the end of article in order they mentioned. References are highlighted with square brackets. References to foreign sources are given in the original language and are accompanied, in case of translation into Russian, with indication of the translation. Textbooks, reference books, guidelines and recommendations are not included in the list of references. References are provided separately (see the guidelines in

«The List of References Standard in English»). The bibliography in English should be issued according to Scopus standard specification. Indicate article DOI if it in the presence.

To accept an article in the journal you should provide the following materials by e-mail **oni-viti@mephi.ru**:

- an article file in Word format;
- the same file in pdf format signed by the author;
- a certificate of material verification for anti-plagiarism
- an application from the institution where the work is made;
- an expert resolution on publication possibility.

THE LIST OF REFERENCES STANDARD IN ENGLISH

For journals:

- [1] Berela A.I., Bylkin B.K., Tomilin S.A., Fedotov A.G. Analiz i predstavlenie sredy deystviya v sisteme proektirovaniya tehnologii demontazha oborudovaniya pri vyvode iz ekspluatatsii bloka AES [The analysis and representation of the action environment in system of technology design of equipment dismantling during NPP unit taking out of operation] [Global nuclear safety]. 2014. № 1(10). P. 25-31 (in Russian).
- [2] Lobkovskaya N.I., Evdoshkina Yu.A. Professional'noe celepolaganie kak sostavlyayushhaya kul'tury bezopasnosti budushhego specialista-atomshhika [Professional Goal-Setting as a Component of the Safety Culture of a Future Nuclear Specialist]. Sovremennoe obrazovanie [Modern Education]. 2017. № 1. P. 32-38. URL: http://e-notabene.ru/pp/article_22498.html (in Russian).

For books:

- [3] Mogilev V.A., Novikov S.A., Faykov Yu.I. Tekhnika vzryvnogo eksperimenta dlya issledovaniya mekhanicheskoy stoykosti konstruktsiy. [Explosive experiment techniques for research of mechanical firmness of designs]. Sarov. FGUP «RFYaTs-VNIIEF» [Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics]. 2007. 215 p. (in Russian).

For web-resources:

- [4] Strategiya razvitiya transportnogo kompleksa Rostovskoy oblasti do 2030 goda [Development strategy of a transport complex of the Rostov region till 2030]. Oficialnij sait Ministerstva transporta Rostovskoy oblasti [Official site of the Transport Ministry of Rostov region]. 2015. URL: <http://mindortrans.donland.ru/Default.aspx?pageid=107384> (in Russian).

For foreign references:

- [5] Gulyaev M., Bogorovskaia S., Shapkina T. The Atmospheric air condition in Rostov Oblast and its effect on the population health // Scientific enquiry in the contemporary world: theoretical basics and innovative approach. CA. USA. B&M Publishing. 2014. P. 56-60.

For materials of conferences:

- [6] Gerasimov S.I., Kuzmin V.A. Issledovaniye osobennostey initsirovaniya svetochuvstvitelny vzryvchatykh sostavov nekogerentnym izlucheniym [Research of features of initiation are photosensitive explosive structures incoherent radiation] [Works of the International conference «I6 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

Полный текст статьи, предназначенной для опубликования, должен быть подписан авторами, сопровождаться справкой о проверке материала через программу антиплагиата (допустимые заимствования и самоцитирование – не более 20%), представлением от учреждения, в котором выполнена работа, и экспертным заключением о возможности опубликования.

В одном файле помещается одна статья, частями которой являются:

- индекс УДК;
- название на русском и английском языках;
- структурированная аннотация (200-250 слов) на русском и английском языках;
- ключевые слова (не менее 10-и речевых единиц) на русском и английском языках;
- список литературы на русском и английском языках;
- сведения об авторах (ФИО, место работы, должность, ученая степень, звание, электронный адрес, телефон) на русском и английском языках;
- 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 упоминаться в тексте статьи. Включение таблиц в статью должно быть целесообразным. Таблицы должны иметь нумерацию и заголовки на русском и английском языках (10 пт). Желательно, чтобы таблицы не превышали одной страницы текста. Рисунки должны быть понятными при черно-белой печати, с нумерацией, подписями на русском и английском языках (10 пт), иметь ссылки в тексте и сопровождаться обоснованиями и выводами. Единицы измерения следует давать в соответствии с Международной системой (СИ).

Статья оформляется в Microsoft Office 97-2003 Word 7.0 через 1 интервал, шрифтом Times New Roman, размером 12 пт, без знаков принудительного переноса и дополнительных пробелов. Поля со всех сторон – 2,5 см. Желательный 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.

С целью повышения качества и объективности публикаций авторы призваны отражать в статьях передовой научный опыт стран дальнего зарубежья, России и СНГ по рассматриваемой проблематике. Библиография оформляется согласно ГОСТу 7.0.100-2018 (дата введения – 01.07.2019) «Библиографическая запись и библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Список литературы включает в не менее 12-и источников (из них не более 3-х ссылок на собственные работы), с обязательным включением как минимум 5-и источников позднее 2017 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 по электронной почте **oni-viti@mephi.ru**:

- файл со статьей в формате Word;
- этот же файл в формате pdf с подписью авторов;
- справка о проверке материала на антиплагиат;
- представление от учреждения, в котором выполнена работа;
- экспертное заключение о возможности опубликования.

ПРИМЕРЫ ОФОРМЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

Для книг с одним автором:

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

Для книг с двумя и более авторами:

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

Для журналов в статье с одним автором:

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

Для журналов в статье с более четырех авторами:

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

Для диссертаций:

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

Для депонированных работ:

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

Описание архивных материалов:

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

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

Материалы конференций:

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

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

Для патентов:

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

Для электронных ресурсов:

Дирина, А.И. Право военнослужащих РФ на свободу ассоциаций / А.И. Дирина // Военное право : сетевой журнал – 2010. – № 2. – URL : <http://voennoepravo.ru/node/2149> (дата обращения: 01.08.2018).

Адрес редакции журнала:

347360, Россия, Ростовская область, г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94. Редакция журнала «Глобальная ядерная безопасность», e-mail: **oni-viti@mephi.ru**, тел.: +79281883628, Лобковская Надежда Ивановна

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

2022, 3(44)

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

Сдано в набор 09.09.2022 г.

Компьютерная верстка Казак Ю.Ю.

Подписано к печати 16.09.2022 г.

Бумага «Снегурочка» 80 г/м². Объем 7,49 печ.л.

Гарнитура «TimesNewRoman»,

Тираж 300 экз.

Отпечатано в типографии ВИТИ (ф) НИЯУ МИФИ

Цена свободная