

NATIONAL RESEARCH NUCLEAR UNIVERSITY MEPhI

GLOBAL NUCLEAR SAFETY

2023, 1(46)

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: <https://glonucsec.elpub.ru/jour/index>

Editor-in-Chief:

M.N. Strikhanov, Dr. Sci. (Phys.-math.), Prof. (MEPhI, Russia)

Deputy Editor-in-Chief:

V.A. Rudenko, Dr. Sci. (Soc.), Prof. (MEPhI, Russia)

Editorial Staff:

V.P. Povarov, Dr. Sci. (Eng.) (Russia)

M.K. Skakov, Dr. Sci. (Phys.-math.), Prof. (Kazakhstan)

V.E. Shukshunov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. (Russia)

A.V. Chernov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. (MEPhI, Russia)

A.P. Elokhin, Dr. Sci. (Eng.), Prof. (MEPhI, Russia)

Y.I. Pimshin, Dr. Sci. (Eng.), Prof. (MEPhI, Russia)

V.V. Krivin, Dr. Sci. (Eng.), Prof. (MEPhI, Russia)

V.I. Ratushny, Dr. Sci. (of Physics and Mathematics), Prof. (MEPhI, Russia)

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

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

M.V. Golovko, Dr. Sci. (Econ.), Prof. (Russia)

N.M. Fomenko, Dr. Sci. (Econ.), Prof. (Russia)

A.N. Shilin, Dr. Sci. (Eng.), Prof. (Russia)

Founder:

National Research Nuclear University MEPhI

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

Computer layout Kazak Yu.Yu.

Published on 21.03.2023

The format is 84 x 108/16. Volume 8,13 printed sheets

Headset "TimesNewRoman",

The circulation is 300 copies

Printed in the VITI (f) printing house of the MEPhI Research Institute

The price is free

Moscow

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

2023, 1(46)

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 (№942)

Группы научных специальностей:

- 1.2 Компьютерные науки и информатика
- 2.2 Электроника, фотоника, приборостроение и связь
- 2.4 Энергетика и электротехника
- 5.2 Экономика

Web-site: <https://glonucsec.elpub.ru/jour/index>

Главный редактор:

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

Заместитель главного редактора:

В.А. Руденко, д-р соц. наук, проф. (Россия)

Редакционная коллегия:

- 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. Пимишин, 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.

Компьютерная верстка Казак Ю.Ю.
Выход в свет 21.03.2023 г.
Формат 84 x 108/16. Объем 8,13 печ. л.
Гарнитура «TimesNewRoman»,
Тираж 300 экз.
Отпечатано в типографии ВИТИ (ф) НИЯУ МИФИ
Цена свободная

Москва

CONTENTS

2023, 1(46)

NUCLEAR, RADIATION AND ENVIRONMENTAL SAFETY

Information Transmission Features of Live Mode Radio Channel When Using Unmanned Dosimetry Complex <i>I.A. Rodionov, A.P. Elokhin, A.B. Rakhmatulin, S.E. Ulin, A.I. Majidov, A.E. Shustov</i>	5
Area Contamination Due to Dry Settling and Point Source Stack Effluents Washout by Precipitates <i>O.A. Gubeladze, A.R. Gubeladze</i>	14

DESIGN, MANUFACTURING AND COMMISSIONING OF NUCLEAR INDUSTRY EQUIPMENT

The Problem of Modeling the Geometry of Twisted Fuel Rods with X-Type Cross Section in the Performance of Thermohydraulic Calculations <i>A.M. Kirkin, A.V. Kuryndin, S.V. Sinegribov, A.O. Smirnov, V.M. Khlobystov</i>	23
Justification of Scanning Contact Potentiometry Applicability to Test NPP Equipment during its Manufacture <i>V.I. Surin, A.S. Shcherban, A.A. Shcherbakov, M.E. Zhidkov, S.A. Tomilin, M.B. Ivanyi</i>	36

OPERATION OF NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

Application of Hierarchical Agglomerative Clustering to Create a Basic Classes Database of WWER 1000/1200 Reactor Facility <i>G.V. Arkadov, I.V. Trykova, D.V. Zvyagincev, K.I. Kotsoev</i>	54
Methodology of Analysis of Thermal Vision Parameters of NPP Standby Diesel Together with Standard Instrument Readings <i>E.A. Abidova, P.V. Povarov, V.M. Popov, D.A. Prytkova, O.Yu. Pugacheva</i>	67
Selecting Burnup Algorithms in OpenMC Using the Calculated Benchmark of LEU Assembly and MOX Fuel <i>H.A. Tanash, D.A. Solovyov, V.G. Zimin, A.L. Lobarev, D.A. Plotnikov, N.V. Schukin</i>	79

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

Corporate System of Modern Nuclear Knowledge <i>S.V. Arsentyev</i>	92
Digital Trends in Strategic Development of Nuclear Power Engineering Enterprises <i>M.V. Golovko, A.N. Setrakov, S.V. Volgina, V.G. Tkachev</i>	104
Author Index of 1, 2023	116

СОДЕРЖАНИЕ

 Номер 1(46), 2023

ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Особенности передачи информации по радиоканалу в режиме реального времени при использовании беспилотного дозиметрического комплекса

Родионов И.А., Елохин А.П., Рахматулин А.Б., Улин С.Е., Маджидов А.И., Шустов А.Е.5

Заражение местности вследствие сухого оседания и вымывания осадками продуктов выброса из точечного источника

Губеладзе О.А., Губеладзе А.Р.14

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

Проблема моделирования геометрии крестообразных витых твэлов при проведении теплогидравлических расчетов

Киркин А.М., Курындин А.В., Синегрибов С.В., Смирнов А.О., Хлобыстов В.М.23

Обоснование применимости метода сканирующей контактной потенциометрии для контроля оборудования АЭС при его изготовлении

Сурин В.И., Щербань А.С., Щербаков А.А., Жидков М.Е., Томилин С.А., Иванов М.Б.36

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Применение иерархической агломеративной кластеризации для создания библиотеки базовых классов акустических событий реакторной установки с ВВЭР 1000/1200

Аркадов Г.В., Трыкова И.В., Звягинцев Д.В., Коцоев К.И.54

Методика анализа тепловизионных параметров резервной дизельной электростанции АЭС совместно с показаниями штатных приборов

Абидова Е.А., Поваров П.В., Попов В.М., Прыткова Д.А., Пугачева О.Ю.67

Выбор алгоритма выгорания в опенмс на примере расчетного бенчмарка сборки LEU и МОХ-топлива ВВЭР-1000

Танаи Х.А., Соловьёв Д.А., Зимин В.Г., Лобарев А.Л., Плотников Д.А., Щукин Н.В. ...79

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

Корпоративная система современных ядерных знаний

Арсентьев С.В.92

Цифровые тренды в стратегическом развитии предприятий атомного энергетического машиностроения

Головки М.В., Сетраков А.Н., Волгина С.В., Ткачев В.Г.104

 Авторский указатель номера 1(46), 2023116

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

УДК 539.1 : 621.39
DOI 10.26583/gns-2023-01-01
EDN JNHPKM

**ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ
ПО РАДИОКАНАЛУ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БЕСПИЛОТНОГО
ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

© 2023 Иван Алексеевич Родионов¹, Александр Прокопьевич Елохин²,
Александр Борисович Рахматулин³, Сергей Евгеньевич Улин⁴,
Азизбек Истамович Маджидов⁵, Александр Евгеньевич Шустов⁶

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

¹ uxanson@bk.ru

² elokhin@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0002-7682-8504>

³ sasa-magic@mail.ru

⁴ seulin@gmail.com

⁵ aimadzhidov@mephi.ru

⁶ aeshustov@mephi.ru

Аннотация. Авария на АЭС Фукусима выявила определенный недостаток традиционных методов регистрации ионизирующего излучения с помощью автоматизированной системы контроля радиационной обстановки, поскольку в условиях развития аварии на АЭС посты системы контроля в результате цунами были повреждены (23 из 24), что не позволило на ранних этапах оценить степень радиоактивного загрязнения местности. В подобных условиях наиболее перспективным методом радиационного контроля, осуществляемого на потенциально опасном участке местности, является бесконтактный метод с использованием беспилотного дозиметрического комплекса (БДК), применение которого позволило бы уменьшить риск облучения дополнительными дозовыми нагрузками персонала, осуществляющего поисковые и разведывательные работы, и дополнительно обеспечить руководство не только информацией относительно радиоактивного загрязнения окружающей среды, но и непосредственно предоставить результаты визуального осмотра территории. Однако, помимо оборудования, используемого для определения радиационного фона (детекторы, спектрометры, радиометры и т.д.), важную часть БДК представляет собой организация дозиметрического комплекса и способ передачи информации. На примере радиомодулей NRF представлен возможный вариант канала передачи данных от дозиметрического комплекса, установленного на БДК, на персональный компьютер оператора.

Ключевые слова: радиационный мониторинг, радиационная безопасность, дозиметрический комплекс, передача данных, радиоканал, модуль NRF24L01+PA+LNA.

Для цитирования: Родионов И.А., Елохин А.П., Рахматулин А.Б., Улин С.Е., Маджидов А.И., Шустов А.Е. Особенности передачи информации по радиоканалу в режиме реального времени при использовании беспилотного дозиметрического комплекса // Глобальная ядерная безопасность. – 2023. – № 1(46). – С. 5-13 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2023-01-01>.

Поступила в редакцию 01.12.2022

После доработки 10.02. 2023

Принята к публикации 21.02.2023

Введение

Авария на АЭС Фукусима выявила определенный недостаток традиционных методов регистрации излучения с помощью автоматизированной системы контроля радиационной обстановки (АСКРО). В момент выброса радиоактивных веществ [1], посты контроля в результате цунами были повреждены (23 из 24) [2-4], что не позволило на ранних этапах оценить степень радиоактивного загрязнения местности [1].

При возникновении необходимости в оценке степени радиоактивного загрязнения территории, существуют два способа действий: традиционный – с непосредственным участием человека на потенциально радиационно-опасном участке местности, и перспективный – бесконтактный, с дистанционным использованием аппаратуры радиационного контроля, например, беспилотного дозиметрического комплекса (БДК) [5]. Применение БДК для поисково-разведочных работ позволило бы уменьшить риск облучения персонала дополнительными дозовыми нагрузками на радиационно-опасном участке.

Основными компонентами БДК являются: радиоуправляемый беспилотный носитель и дозиметрический комплекс (ДК).

Основные задачи ДК – это сбор, обработка и передача информации о состоянии радиационной обстановки исследуемой окружающей среды, возможность воспроизводства результатов измерений, определение координат и высоты полета. Задача носителя сводится к доставке ДК на заданную высоту и указанное место. Для реализации данных задач возможно использование следующего оборудования: ксеноновый γ -спектрометр (КГС), γ -детектор для измерения мощности дозы (УДМГ), датчик местоположения (GPS и/или ГЛОНАСС), высотомер, отладочные платы и летательные аппараты различного типа.

При разработке ДК возникает практическая задача – осуществление передачи информации в режиме реального времени с детекторов БДК на ПК оператора. Одним из возможных каналов подобной передачи данных является радиоканал, одним из преимуществ которого перед Wi-Fi¹ оборудованием является относительная простота в организации радиомоста, состоящая, например, в использовании двух радиомодулей, работающих как в симплексном режиме, так и в режиме дуплексной и полудуплексной² связи. Использование только двух модулей значительно упрощает процесс отправки и получения данных на территориях или областях с плохим покрытием сигнала и на большие расстояния.

Представленная работа посвящена вопросу создания основ передачи информации по радиоканалу в лабораторных условиях.

Описание системы беспроводной передачи информации

При работе ДК на высоте полета возникает необходимость в следующих действиях:

- хранение и обработка данных;
- передача и получение данных.

В работе [6] приведён возможный вариант реализации ДК на беспилотном летательном аппарате – это КГС, не требующий, в отличие от полупроводниковых

¹Передача данных по радиоканалу принципиально не отличается от Wi-Fi, также представляющего собой радиомост. Различия состоят в использовании иных протоколов, в том числе нестандартных, а также в использовании направленных антенн (в отличие от преимущественного использования антенн с круговой диаграммой у Wi-Fi аппаратуры) и повышенной мощности излучения.

²Дуплексная связь – это связь с возможностью передачи информации между двумя устройствами в обоих направлениях. При полудуплексной связи передача данных в каждый момент времени возможна только в одном направлении (т.е. их можно либо передавать, либо принимать), тогда как при полудуплексной связи данные можно передавать и принимать одновременно. Симплексная связь – связь, при которой информация передаётся только в одном направлении.

детекторов при работе, криогенного оборудования и обладающий значительно более высоким энергетическим разрешением по сравнению со спектрометрами, использующими сцинтилляционный кристалл NaI(Tl), и γ -детектор УДМГ, датчик местоположения (GPS и/или ГЛОНАСС) и высотомер, определяющий высоту полета БДК, знание которой позволяет проводить корректный расчет радиоактивного загрязнения окружающей среды, включая и радиоактивный след на подстилающей поверхности [6].

В качестве оборудования для определения местоположения и высоты полета могут быть применены GPS-модуль NEO-6M и модуль GY-BMP280-3.3 (рис. 1). Алгоритм работы модуля GY-BMP280-3.3 заключается в считывании данных с чувствительных элементов, предназначенных для измерения давления и температуры, установленных на плате [7], по которым в дальнейшем может вычисляться высота полета БДК. Определение местоположения с помощью GPS-модуля NEO-6M происходит с помощью данных, которые он получает от спутников [8].

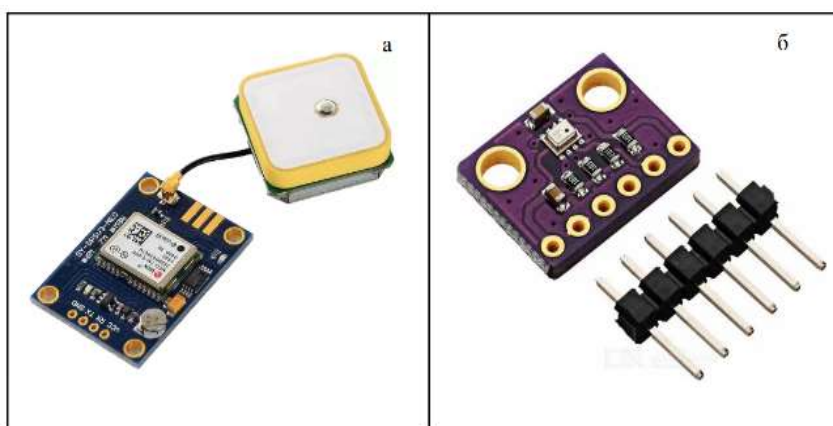


Рисунок 1 – GPS-модуль NEO-6M (а) и модуль GY-BMP280-3.3 (б) [GPS module NEO-6M (a) and module GY-BMP280-3.3 (b)]

Для хранения и обработки данных могут быть применены различные отладочные платы со встроенными однокристальными микроконтроллерами (STM32F103c8t6, STM32F401RET6, STM32F4DISCOVERY, RaspberryPi 4, ESP32 и т.д.), в программное обеспечение (ПО) которых встраивается необходимая функция и алгоритм действия. В данной работе была применена отладочная плата ESP32 (рис. 2). Для цели передачи и получения данных между оператором и ДК был создан канал связи, работающий в симплексном режиме передачи данных.



Рисунок 2 – Отладочная плата ESP32-WROOM-32 [ESP32-WROOM-32 debug board]

Кроме того, при использовании БДК важной характеристикой для аппаратуры, создающей канал связи, является дальность связи. Так, исходя из анализа работ [9-11], дальность связи может быть не меньше одного километра.

Одним из возможных способов создания канала передачи данных от ДК оператору является использование модулей радиосвязи, что значительно упрощает процесс организации канала связи.

Упрощение заключается в том, что при попытке удаленно получить данные от ДК на большом расстоянии на территории с плохим покрытием сигнала, оператору не требуется дополнительного подключения к ближайшей точке доступа в отличие от использования технологии Wi-Fi.

Однако в процессе передачи данных может возникнуть проблема – отправляемый файл ДК превышает максимальный объем документа (объем памяти, занимаемой документом), который может отправить радиомодуль. На примере КГС и радиомодуля NRF24L01+PA+LNA (NRF) (рис. 3) [12] с дальностью связи порядка 1 километра рассмотрим способы решения этой проблемы. При этом следует отметить, что использование указанной дальности связи в 1 километр согласуется с открытыми данными [13].



Рисунок 3 – Модуль радиосвязи NRF24L01+PA+LNA, где:
1 – антенна; 2 – NRF24L01+ [Radio communication module NRF24L01+PA+LNA, where:
1 – Antenna; 2 – NRF24L01+

Наряду с несомненными достоинствами КГС, о чем отмечалось выше, у этих спектрометров имеется существенный недостаток, а именно, их высокая чувствительность к внешним вибро-акустическим воздействиям, что существенно ограничивает область применения данного типа аппаратуры [14]. Для устранения указанной проблемы можно использовать различные методы. Например, спектрометрическое и другое оборудование, включая аппаратуру наблюдения, целесообразно установить на двухосевой гиросtabilизированной платформе, снижая, таким образом, вибро-акустические эффекты результатов измерений. В работе [14] для повышения точности результатов измерений, передаваемых на ПК, и решения указанной проблемы был разработан блок электроники (БЭ), который располагался перед ПК, осуществляя дополнительную фильтрацию результатов измерений (рис. 4).

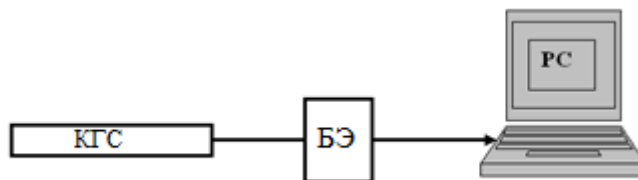


Рисунок 4 – Функциональная связь между КГС и ПК [Functional link between the XeGS and the PC]

Таким образом, происходит следующая процедура: результаты измерений, сформированные КГС, поступают на БЭ, обрабатываются с помощью встроенного в него ПО и отправляются пакетом данных на ПК.

Особенность отправки данных, прошедших через блок БЭ в ПК, заключается в том, что отправка осуществляется пакетом, который в зависимости от типа подключения (USB или RS-485) отличается. Так для типа подключения USB этот массив составляет 16384, а для RS-485 4096 символов, соответственно радиомодуль должен обладать способностью передавать массивы подобного объема. Кроме того, следует учитывать, что БЭ передает данные короткими пакетами длительностью (1-3 с.).

Из-за приведенной выше особенности применения модуля NRF, максимальный объем документа, который он может передать – это 32 байта [12], что представляет собой при решении данной задачи определенную проблему, требующую найти способ для ее решения.

С этой целью рассмотрим способ решения указанной проблемы на примере передачи сигнала от КГС на ПК через модуль NRF. Модуль NRF подсоединяется к микропроцессору (ESP32, STM32 и т.д.), формируя блок, в котором в дальнейшем микропроцессор осуществляет управление модулем NRF и, в конечном итоге, прием и передачу информации (рис. 5).

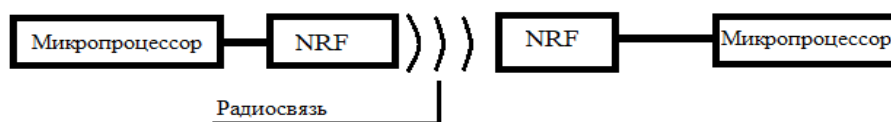


Рисунок 5 – Схематическое устройство радиоканала [Schematic diagram of the radio channel]

Таким образом, с учетом рисунка 4, окончательно схема выглядит следующим образом (рис. 6).

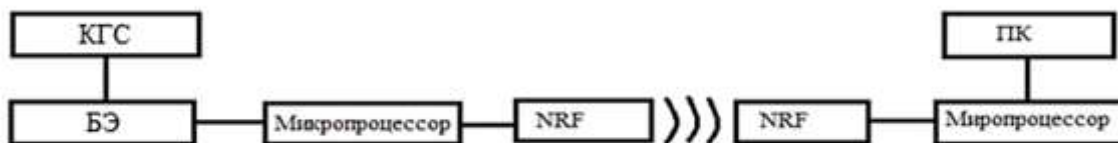


Рисунок 6 – Схема организации радиоканала между КГС и ПК [Schematic diagram of the radio link between the XeGS and the PC]

В памяти микроконтроллера (передатчик) со стороны БЭ выделяется область для принимаемого массива данных (N), который затем разбивается на части по 32 байта (рис. 7).

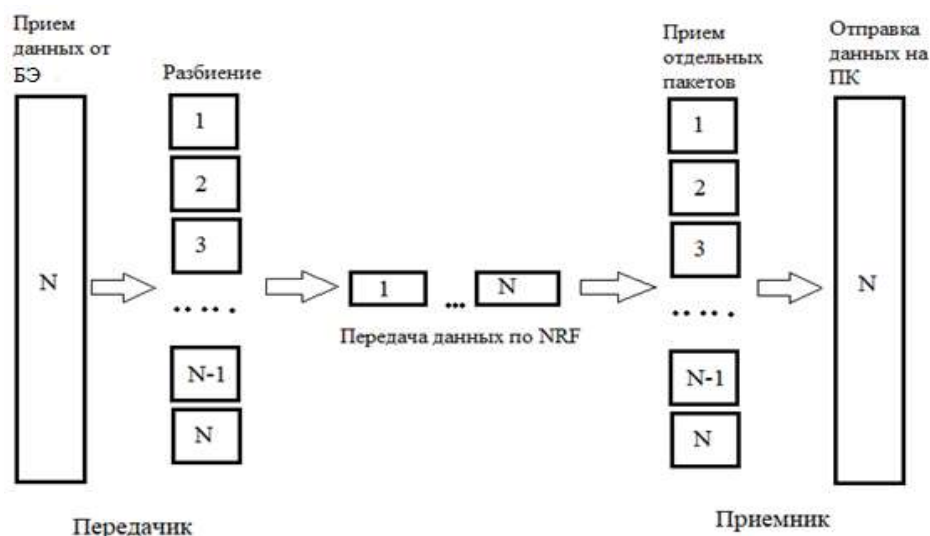


Рисунок 7 – Алгоритм разбиения и передачи информации [Algorithm for breaking down and transferring information]

Затем каждая образованная часть отправляется по модулю NRF на второй микропроцессор (приемник), с последующей отправкой на ПК. В случае если один или несколько из N передаваемых подмассивов данных (рис. 7) будет не равен 32 байтам, то он считается «поврежденным» в результате передачи по радиоканалу и в память микроконтроллера заноситься не будет (рис. 8). Для удобства на рисунке 8 алгоритм работы «Передатчика» и «Приемника» показаны отдельно.

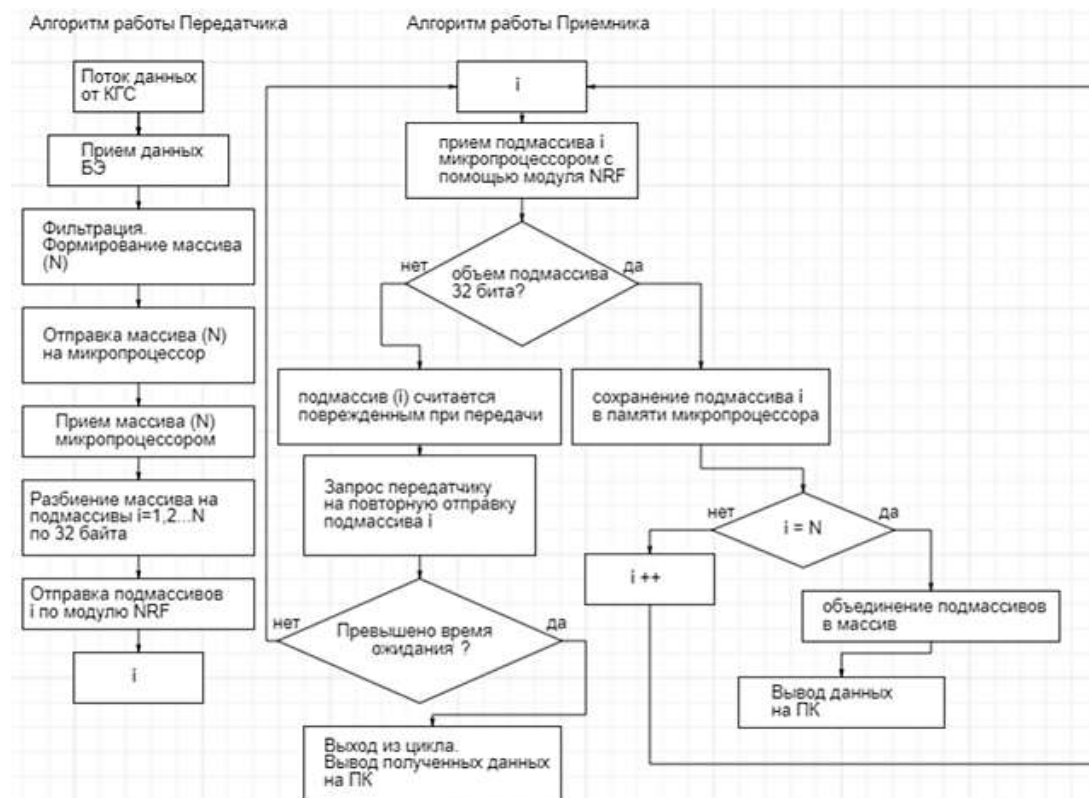


Рисунок – 8 Блок-схема передачи информации [Block diagram of information transfer]

В силу того, что модуль NRF способен передавать информацию со скоростью в диапазоне от 250 кбит/с до 2 Мбит/с, то дробление начальных данных на подмассивы по 32 байта дает возможность полной их передачи до поступления новых данных от КГС. Отметим, что «время ожидания» является регулируемым параметром, настраиваемым при программировании микроконтроллера.

Поскольку вопрос передачи данных по радиоканалу непосредственно связан с задачей радиационного контроля окружающей среды, а именно, с оценкой радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности, обусловленной, например, следом радиоактивного выброса, то для оценки этого загрязнения в первую очередь необходимо оценивать радионуклидный состав радиоактивной примеси, лежащий на этой поверхности. А для этой цели и возникает необходимость проведения спектрального анализа γ -излучения радионуклидов, осуществляемого с помощью КГС, который располагается на БДК. В регистрируемом спектре γ -излучения с помощью программного обеспечения выделяют пики полного поглощения, определяя значение энергии γ -квантов, по значению которой/ых и определяют все радиационные характеристики (тип радионуклида, период полураспада, поверхностная активность и т.д.), определяющие уровень радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности для дальнейшего принятия решений типа: закрыть форточки и воздержаться в течение нескольких дней от прогулок или эвакуация населения временная или полная.

Для демонстрации принципа работы схемы, представленной на рисунке 8 и проверки работы модуля NRF, была проведена передача данных в лабораторных условиях, при которых вибро-акустические эффекты были исключены. В качестве

передаваемой информации, имитировалась передача спектра Cs-137 от детектора по радиоканалу, изображенному на рисунке 5. При проведении эксперимента, расстояние между приемником и передатчиком составляло 1 метр.

На рисунке 9 приведена визуализация передаваемого спектра Cs-137, на которой показано распределение количества пришедших импульсов на канал детектора для радионуклида Cs-137.

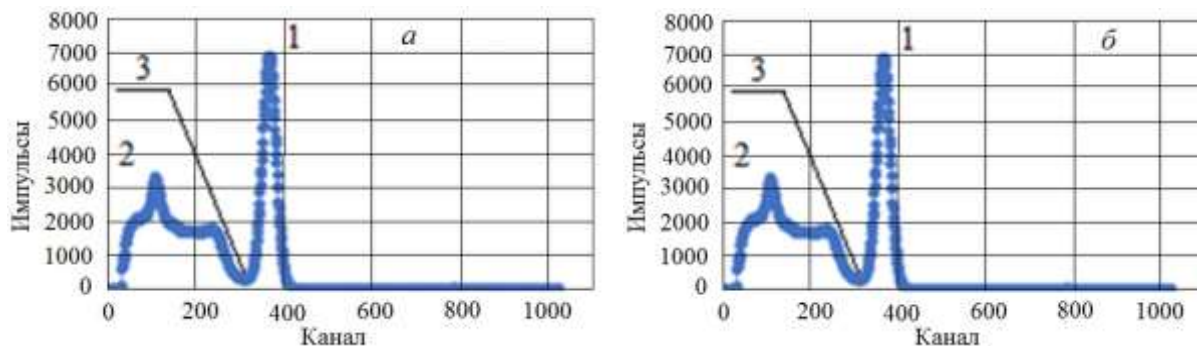


Рисунок – 9 Исходный (передаваемый) спектр Cs-137 (а); полученный и обработанный по модулю NRF (б)
[Initial (transmitted) spectrum of Cs-137 (a); NRF derived and processed (b)]

Приведенный спектр содержит пик полного поглощения (на рисунке 9 отмечен «1»), который является следствием испускания моноэнергетических γ -квантов (0,662 МэВ) Ba-137m, представляющим собой продукт β -распада Cs-137, и непрерывное распределение слева от пика с содержащимся на нем небольшим максимумом (пиком обратного рассеяния γ -квантов на рисунке 9 отмеченным «2»), образующееся в результате комптон-эффекта [15,16]. Область «3» на рисунке 9 обусловлена тем, что спектр электронов отдачи, определяющих комптон-эффект, обрывается в этой области, что и приводит к образованию минимума перед пиком полного поглощения.

Анализируя исходный и полученный спектр, можно констатировать, что в лабораторных условиях проведения эксперимента положения пиков полного поглощения («1»), обратного рассеяния («2»), а также области минимума («3») не изменились, кроме того, полностью сохранилась кривая комптоновского распределения. Таким образом, форма спектра Cs-137 со всеми «особыми точками» сохранилась. Это говорит о том, что при передаче данных от БДК оператору при исследовании ядерно-опасного объекта радиомодуль не будет вносить каких-либо дополнительных возмущений в передаваемые данные.

Таким образом, можно сделать вывод, что приведенный выше алгоритм преобразования носит чисто технический характер передачи информации и не влияет на физическую форму спектра, что позволяет не учитывать технические ограничения модулей NRF при передаче данных в режиме реального времени. Следует отметить, что данный алгоритм может быть распространён и на другие модули передачи информации.

Заключение

В работе представлен возможный вариант организации ДК с помощью КГС, детектора типа УДМГ, отладочных плат, модуля GPS и высотомера. Рассмотрен вариант передачи результатов измерений БДК с помощью радиоканала и их некоторые особенности, которые могут возникать в процессе измерений и передачи информации.

На примере получения пакета данных от БЭ, присоединенного к КГС и модуля NRF, рассмотрена возможность решения технической проблемы, связанной с передачей информации по объему превосходящей возможности передачи радиомодуля.

На примере передачи и приема спектра Cs-137 показано, что приведенные алгоритмы действия не влияют на качество передаваемой информации о спектре, что указывает на возможность применения данного метода для получения данных, поступающих оператору с БДК, в режиме реального времени.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Stohl, A., Seibert, P., Wotawa G., Arnold D., Burkhardt J. F., Eckhardt S., Tapia C., Vargas A., and Yasunari T. J. Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 12. 2313–2343. <https://doi.org/10.5194/acp-12-2313-2012>.
2. Omoto, A., 2013. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section a: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*.
3. Nuclear Accident Independent Investigation Commission. 2012. *The Official Report of the Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission*. NAIIC. Tokyo.
4. Povinec, P.P., Hirose, K., Aoyama, M., 2013. *Fukushima Accident*. Elsevier, Boston.
5. Елохин, А.П. Методы и средства систем радиационного контроля окружающей среды / А.П. Елохин // Монография. – Москва: НИЯУ МИФИ, 2014. – 520 с.
6. Елохин, А.П. Методы оценки радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности / И.А. Родионов, А.П. Елохин // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – №1 (42). – С. 6–23.
7. Data sheet. BMP280 Digital Pressure Sensor. <https://amperkot.ru/static/3236/uploads/datasheets/BST-BMP280.pdf>.
8. NEO-6 u-blox 6 GPS Modules. Data Sheet. https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf.
9. Šáleka O., Matolína M., Grycb L. Mapping of radiation anomalies using UAV mini-airborne gamma-ray spectrometry // *Journal of Environmental Radioactivity* 182 (2018) 101–107.
10. Parshin A., Morozov V., Snegirev N., Valkova E., Shikalenko F. Advantages of Gamma-Radiometric and Spectrometric Low-Altitude Geophysical Surveys by Unmanned Aerial Systems with Small Scintillation Detectors. *Appl. Sci.* 2021, 11, 224. <https://doi.org/10.3390/app11052247/>.
11. Yuki Sato, Shingo Ozawa, Yuta Terasaka, Kojiro Minemoto, Satoshi Tamura, Kazutoshi Shingu, Makoto Nemoto, Tatsuo Torii. Remote detection of radioactive hotspot using a Compton camera mounted on a moving multi-copter drone above a contaminated area in Fukushima. *Journal of nuclear science and technology*. – 2020. – Vol. 57, №. 6. – pp. 734–744.
12. nRF24L01+ Single Chip 2.4GHz Transceiver Product Specification v1.0. Datasheet. https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF24L01P_PS_v1.0.pdf.
13. Радиомодуль NRF24L01+ / PA+LNA 2.4G (Trema-модуль V2.0). <https://wiki.iarduino.ru/page/NRF24L01-trema/>
14. Novikov, A.S., Ulin, S.E., Dmitrenko, V.V., Uteshev, Z.M., Vlasik, K.F., Grachev, V.M., Efremenko, Y.V., Chernysheva I.V., Shustov A.E. New modification of xenon gamma-ray detector with high energy resolution. *Optical Engineering*. – Vol. 53, Issue 2, 021108 (November 2013). <https://doi.org/10.1117/1.OE.53.2.021108>.
15. Болоздыня, А.И. Экспериментальная ядерная физика. Лекция №6. Гамма-излучение ядер / Болоздыня А.И. // ИФТИС НИЯУ МИФИ. Лаборатория экспериментальной ядерной физики. – 2017. – 32 с. <http://enr.mephi.ru>.
16. Гусев, Н.Г., Дмитриев, П.П. Квантовое излучение радиоактивных нуклидов / Н.Г. Гусев, П.П. Дмитриев. – Москва: Атомиздат, 1977. – 394 с.

REFERENCES

- [1] Stohl A., Seibert P., Wotawa G., Arnold D., Burkhardt J. F., Eckhardt S., Tapia C., Vargas A., and Yasunari T. J. Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 12. 2313–2343. <https://doi.org/10.5194/acp-12-2313-2012>.
- [2] Omoto A. 2013. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section a: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. (in English)
- [3] Nuclear Accident Independent Investigation Commission. 2012. *The Official Report of the Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission*. NAIIC. Tokyo. (in English)
- [4] Povinec P.P., Hirose K., Aoyama M. 2013. *Fukushima Accident*. Elsevier. Boston. (in English)
- [5] Elokhin A.P. Metody i sredstva sistem radiatsionnogo monitoringa okruzhayushchey sredy [Methods and Means of Environmental Radiation Monitoring Systems] Monograph. Moscow. NRNU MEPhI. 2014. 520 p. (in Russian)
- [6] Rodionov I.A., Elokhin A.P. Metody otsenki zagryazneniya podstilayushchey poverkhnosti. [Methods of Assessing Radioactive Contamination of the Underlying Surface]. *Global'naya yadernaya bezopasnost` Global Nuclear Safety*, 2022, No.1 (42). pp. 6 – 23. (in Russian).
- [7] Data sheet. BMP280 Digital Pressure Sensor. <https://amperkot.ru/static/3236/uploads/datasheets/BST-BMP280.pdf>. (in English)
- [8] NEO-6 u-blox 6 GPS Modules. Data Sheet. https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf. (in English)
- [9] Mapping of radiation anomalies using UAV mini-airborne gamma-ray spectrometry / O. Šáleka, M. Matolína, L. Grycb // *Journal of Environmental Radioactivity* 182 (2018) 101–107. (in English)
- [10] Advantages of Gamma-Radiometric and Spectrometric Low-Altitude Geophysical Surveys by Unmanned Aerial Systems with Small Scintillation Detectors / A. Parshin, V Morozov, N. Snegirev,

- E. Valkova, F. Shikalenko // Appl. Sci. 2021, 11, 224. <https://doi.org/10.3390/app11052247/>. (in English)
- [11] Remote Detection of Radioactive Hotspot Using a Compton Camera Mounted on a Moving Multi-Copter Drone above a Contaminated Area in Fukushima / Yuki Sato, Shingo Ozawa, Yuta Terasaka, Kojiro Minemoto, Satoshi Tamura, Kazutoshi Shingu, Makoto Nemoto, Tatsuo Torii // JOURNAL OF NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY. – 2020. – VOL. 57, No. 6. – pp. 734–744. (in English)
- [12] nRF24L01+ Single Chip 2.4GHz Transceiver Product Specification v1.0. Datasheet. https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF24L01P_PS_v1.0.pdf.
- [13] Radiomodul NRF24L01+ / PA+LNA 2.4G (Трема-модуль V2.0). [Radio Module NRF24L01+ / PA+LNA 2.4G (Trema-Module V2.0)]. <https://wiki.iarduino.ru/page/NRF24L01-trema/>. (in Russian).
- [14] New Modification of Xenon Gamma-Ray Detector with High Energy Resolution / A.S. Novikov, S.E. Ulin, V.V. Dmitrenko, Z.M. Uteshev, K.F. Vlasik, V.M. Grachev, Y.V. Efremenko, I.V. Chernysheva, A.E. Shustov // Optical Engineering. – Vol. 53, Issue 2, 021108 (November 2013). <https://doi.org/10.1117/1.OE.53.2.021108>.
- [15] Bolozdynya A.I. Eksperimental'naya yadernaya fizika. Lektsiya №6. Gamma-izlucheniye yader. [Experimental Nuclear Physics. Lecture No.6. Gamma Radiation of Nuclei] IFTS Mephi. Laboratoriya eksperimental'noy yadernoy fiziki. [IFTIS NRNU MEPhI. Experimental Nuclear Physics Laboratory] 2017, 32 p. <http://enp.mephi.ru> (in Russian).
- [16] Gusev N.G., Dmitriyev P.P. Kvantovoye izlucheniye radioaktivnykh nuklidov. [Quantum Radiation of Radioactive Nuclides]. Moscow. Atomizdat. 1977. 394 p. (in Russian).

Information Transmission Features of Live Mode Radio Channel When Using Unmanned Dosimetry Complex

© 2023 Ivan A. Rodionov, Alexander P. Elokhin², Alexander B. Rakhmatulin³, Sergey E. Ulin⁴, Azizbek I. Majidov⁵, Alexander E. Shustov⁶

National Research Nuclear University (MEPhI), Moscow, Russia

¹uxanson@bk.ru

²elokhin@yandex.ru, ORCID iD: 0000-0002-7682-8504, WoS ResearcherID: F-9573-2017

³sasa-magic@mail.ru

⁴seulin@gmail.com

⁵aimadzhidov@mephi.ru

⁶aeshustov@mephi.ru

Received by the editorial office on 12/21/2022

After revision on 02/10/2023

Accepted for publication 02/21/2023

Abstract. The accident at the Fukushima NPP has revealed a certain drawback of traditional methods of registration of ionizing radiation by means of the automated radiation monitoring system, because in the conditions of the accident at the NPP the monitoring posts of the system were damaged as a result of the tsunami (23 of 24), which did not allow to evaluate the degree of radioactive contamination of the area in the early stages. In such conditions the most promising method of radiation control carried out on the potentially hazardous area is a non-contact method using an unmanned dosimetry complex (UDC), the application of which would reduce the risk of exposure to additional dose loads of personnel carrying out search and reconnaissance work and, additionally, provide management not only with information regarding radioactive contamination of the environment, but also directly provide the results of the search and reconnaissance. However, apart from the equipment used to determine the radiation background (detectors, spectrometers, radiometers, etc.) an important part of the UDC is the organization of the dosimetry complex and the way of information transfer.

A possible variant of data transmission channel from the dosimetry complex installed on the UDC to the operator's personal computer is presented using NRF radio modules as an example.

Keywords: radiation monitoring, radiation safety, dosimetry system, data transmission, radio channel, NRF24L01+PA+LNA module.

For citation: Rodionov I.A., Elokhin A.P., Rakhmatulin A.B., Ulin S.E., Majidov A.I., Shustov A.E. Information Transmission Features of Live Mode Radio Channel When Using Unmanned Dosimetry Complex // Global Nuclear Safety. 2023. No. 1(46). P. 5-13 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2023-01-01>.

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

УДК 539.1 : 504.05
DOI 10.26583/gns-2023-01-02
EDN KFEKZC

**ЗАРАЖЕНИЕ МЕСТНОСТИ ВСЛЕДСТВИЕ СУХОГО ОСЕДАНИЯ
И ВЫМЫВАНИЯ ОСАДКАМИ ПРОДУКТОВ ВЫБРОСА
ИЗ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА**

© 2023 Олег Автандилович Губеладзе¹, Автандил Рубенович Губеладзе²

^{1,2}Донской государственный технический университет (ДГТУ), Ростов-на-Дону, Россия

¹buba26021966@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6018-4989>

²buba26021966@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6966-6391>

Аннотация. В статье рассматривается заключительный этап развития аварийной ситуации, сопровождающейся взрывом (сгоранием) взрывчатого вещества, входящего в состав ядерного боеприпаса или «грязной» бомбы и диспергированием ядерного делящегося материала с выходом в окружающую среду. Приведены формулы для экспресс-оценки количества примеси, выпавшей на поверхности земли в результате сухого оседания и вымывания осадками продуктов выброса.

Ключевые слова: малогабаритная ядерная энергетическая установка, источник радиоактивного заражения, диспергирование, облако выброса, концентрация примеси, полная экспозиция.

Для цитирования: Губеладзе О.А., Губеладзе А.Р. Заражение местности вследствие сухого оседания и вымывания осадками продуктов выброса из точечного источника // Глобальная ядерная безопасность. – 2023. – № 1(46). – С. 14–22 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2023-01-02>.

Поступила в редакцию 12.12.2022

После доработки 13.02.2023

Принята к публикации 21.02.2023

Наиболее опасным исходом развития аварийных ситуаций (АС) с ядерными боеприпасами (ЯБП) в вооруженных конфликтах с участием государств, обладающих ядерным оружием (ЯО), является их взрыв и сгорание, когда в окружающую среду выделяются: оксид плутония, уран-235 и уран-238 (как чистый, так и в виде оксида) и тритий. Возникновение подобных АС возможно в вооруженных конфликтах с участием государств, обладающих ядерным оружием (ЯО) [1–3]. Кроме того, выброс радиоактивных веществ в атмосферу возможен при осуществлении акта ядерного терроризма [4].

Украина практически сразу после присоединения к Договору (как неядерное государство) приступила к научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам с целью формирования технологической базы для создания ЯО. Непосредственное участие в этом принимал Харьковский физико-технический институт, экспериментальная база которого позволяла проводить широкий спектр исследований по изучению ядерных материалов, в том числе отработавших реакторных топливных сборок. Для разработки ЯО использовалась зона Чернобыльской АЭС, где

также шли работы по изготовлению так называемой «грязной» бомбы (ГБ) [5]. Сама ГБ, как средство вооруженной борьбы не имеет смысла, так как ее поражающая способность невысока, однако она обеспечивает высокий уровень радиации в месте подрыва и является исключительно террористическим оружием [4].

В работах [6, 7] рассмотрено развитие аварийной ситуации, сопровождающейся взрывом (сгоранием) взрывчатого вещества, входящего в состав ЯБП, и диспергированием ядерного делящегося материала с выходом в окружающую среду. Проведено моделирование распространения примеси в атмосфере в случае неактивного взрыва. Подобные процессы характерны и для взрыва «грязной» бомбы.

Под источником радиоактивного заражения будем понимать область пространства, в которой распределены инжектированные в окружающую среду радиоактивные продукты после завершения газодинамических возмущений, вызванных взрывом ГБ (мгновенный выброс). Распределение радиоактивных продуктов по размерам образовавшихся аэрозолей определяется плотностью распределения $f(d)$, где d – диаметр частицы. Активность продуктов, приходящаяся на аэрозоли размерами от d до $d + \delta d$, составит величину $A_v f(d) \delta d$, где A_v – приземная объемная активность примеси. С математической точки зрения источник, первоначальными размерами которого можно пренебречь в сравнении расстоянием до точки регистрации примеси, считается точечным [3, 8], осуществляется перенос радиоактивных аэрозолей в окружающую среду.

Общее содержание примеси в облаке выброса по мере его движения уменьшается в результате сухого оседания, а также вымывания атмосферными осадками. Это описывается фактором истощения $F(x)$, который представляет собой долю выброшенного количества нуклидов, остающихся в облаке к моменту, когда его центр удалится на расстояние x от точки выброса. В результате сухого и «мокрого» оседания формируется поток выпадений примеси на поверхность земли.

Плотность потока примеси у поверхности вследствие сухого оседания представлена выражением (1):

$$A_s(x, y) = \omega_g A_v(x, y, 0), \quad (1)$$

где $A_v(x, y, 0)$ – приземная объемная активность примеси в точке (x, y) ;

ω_g – скорость сухого оседания, определяемая отношением интенсивности оседания к концентрации в приземном слое.

Воспользовавшись выражением для определения полной экспозиции на оси облака выброса [6], запишем формулу (2) для оценки количества примеси, выпавшей на поверхности земли:

$$A_\omega(x, y) = \omega_g \psi_t = \omega_g \frac{Q'_x}{\pi \cdot \sigma_{y1} \cdot \sigma_{z1} \cdot u} e^{-1/2 \left[\frac{y^2}{\sigma_{y1}^2} + \frac{h^2}{\sigma_{z1}^2} \right]}, \quad (2)$$

где Q'_x – остаточная мощность выброса в точке (x, y) .

Уменьшение мощности выброса на единицу пути представлена формулой (3):

$$\frac{\partial Q'_x}{\partial x} = -\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\omega_g}{u} \int_0^x \frac{dx}{\sigma_z \exp(h^2/2\sigma_z^2)}. \quad (3)$$

Проинтегрировав данное выражение на всем пути, получаем выражение (4) для функции истощения вследствие сухого осаждения:

$$F_{\omega} = \exp \left[- \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\omega_g}{\pi} \int_0^x \frac{1}{\sigma_z} e^{-\frac{h^2}{2\sigma_z^2}} dx \right], \quad (4)$$

где h – высота мгновенного источника;

σ_z – вертикальная дисперсия распределения примеси в облаке выброса.

Скорость сухого оседания у тяжелых примесей обусловлена силой тяжести и называется также скоростью седиментации. В атмосфере встречаются аэрозоли с размерами широкого спектра – от тысячных долей микрона до сотен микронов [9-11]. Седиментация является доминирующим процессом для частиц размером более 50 мкм. Для меньших размеров доминирует диффузия.

Скорость падения сферических частиц в воздухе определяется формулой (5):

$$\omega_g = 2\rho_0 g \cdot r_a / (9\rho_B \cdot \nu), \quad (5)$$

где ρ_a – плотность частиц аэрозоли;

r_a – радиус этих частиц;

g – ускорение свободного падения;

ν – коэффициент молекулярной вязкости воздуха;

ρ_B – плотность воздуха.

Надо иметь в виду, что эта формула справедлива для частиц, размеры которых значительно превышают среднюю длину свободного пробега молекул воздуха (при нормальных условиях $8 \cdot 10^{-6}$ см). Это нижний предел для размеров частиц, когда выполняется закон Стокса. Верхний предел для размеров частиц равен ~ 30 мкм, а для еще больших частиц (≥ 100 мкм) величину скорости седиментации определяют по формуле Ньютона. Очень крупные частицы вследствие больших скоростей осаждения находятся в воздухе непродолжительное время и их диффузию можно не учитывать.

Рассмотрим загрязнение поверхности земли радиоактивными аэрозолями вследствие их вымывания из облака различными осадками. Плотность потока примеси на поверхность в этом случае представлена выражением (6):

$$A_s(x, y) = \Lambda \int_0^{H_z} A_v(x, y, z) dz, \quad (6)$$

где H_z – высота нижней границы облака;

Λ – постоянная вымывания, зависящая от типа осадков, спектра дождевых капель и интенсивности осадков.

Функция истощения облака, обусловленная мокрым оседанием, представлена выражением (7):

$$F(x) = \exp(-\Lambda x/u). \quad (7)$$

Полная функция истощения (8) получается в результате перемножения (4) и (7):

$$A_s = \frac{Q}{\pi C^2 (ut)^{2-n}}, \quad (8)$$

где C – коэффициент Сеттона;

u – составляющая средней скорости перемещения примеси по направлению x ;

n – показатель стабильности атмосферы.

Продифференцировав выражение для определения полной экспозиции на оси облака выброса [6] по x , получим расстояние точки максимальной концентрации от источника по формуле (9):

$$X_0 = \left(\frac{h^2}{2C^2} \right)^{\frac{1}{2-n}}. \quad (9)$$

Максимальная экспозиция от концентрации в этой точке представлена выражением (10):

$$\psi_{t\max} = Q / (\pi \cdot u \cdot h^2 \cdot e) \quad (10)$$

Оценим высоту подъема радиоактивного облака от мгновенного выброса. Так как мгновенный клуб взрыва имеет температуру больше, чем температура окружающего воздуха, то на него действует сила плавучести, под действием которой клуб поднимается до тех пор, пока его температура не сравняется с температурой атмосферы.

В модели Сеттона высота подъема радиоактивного облака определяется по формуле (11):

$$h = \left[\frac{2(3m + 2p)W}{9c_p \rho_B \pi^{3/2} C^3 a} \right]^{\frac{1}{p+3m/2}}, \quad (11)$$

где ρ_B – плотность воздуха;

W – количество тепла, выделенное при взрыве;

c_p – удельная теплоемкость газов облака при постоянном давлении;

a, m, p – постоянные коэффициенты [3].

Будем считать удельную теплоемкость газов облака взрыва равной удельной теплоемкости взрывчатого вещества (ВВ) при постоянном давлении $c_p \approx 0,2$ ккал/(кг·К) [12]. Примем количество тепла, выделенное при взрыве равным теплоте реакции взрывчатого превращения (для одного килограмма ВВ $W \approx 1000$ ккал/кг).

Для обычной атмосферной турбулентности при горизонтальном перемещении облака $a = 0,001$ К/м, $m = 7/4$, $p = 1$, $C = 0,25$ м^{1/8}. Высота подъема облака представлена выражением (12):

$$h \approx 2,66 \sqrt{F_{nl} / S_{AT}}, \quad (12)$$

где F_{nl} – сила плавучести;

S_{AT} – параметр устойчивости атмосферы.

Сила плавучести, формула (13):

$$F_{nl} = gW / c_p \rho_B T_B, \quad (13)$$

где T_B – температура воздуха.

Параметр устойчивости, формула (14):

$$S_{AT} = \frac{g}{T_B} \left(\frac{\partial \Theta}{\partial z} \right), \quad (14)$$

где $\partial \Theta / \partial z$ – градиент температуры.

При мощности заряда ВВ 10 кг в ТЭ высота подъема облака взрыва, оцененная по приведенным зависимостям, в наиболее благоприятных погодных условиях (отсутствие ветра и осадков, положительная температура и низкая влажность воздуха) может достигать ~150 м. В остальных случаях следует ожидать уменьшение h .

Зная величину предельного объема V_{np} продуктов детонации [6], легко определить величину энергии продуктов взрыва, перешедшей в ударную волну $W_{y\phi} = m_{\phi\phi} [1 - P_a V_{np} / (k^a - 1) \rho_{\phi\phi} V_0 B]$. Здесь $m_{\phi\phi}$ – масса взрывчатого вещества; k^a – показатель адиабаты; $\rho_{\phi\phi}$ – первоначальная плотность ВВ; V_0 – начальный объем ВВ; B – удельная теплота реакции. Для типичных ВВ величина $W_{y\phi}$ составляет 0,97 от начальной энергии взрыва.

В зависимости от размеров частиц и метеорологических условий след (зона загрязнения поверхности земли) может иметь различную конфигурацию. Ось следа совпадает с направлением вектора среднего ветра в слое от поверхности земли до высоты источника.

Характер изменения концентрации с расстоянием x существенно зависит от h (координата z). На некотором расстоянии x_m от источника у поверхности отмечается максимальное значение концентрации примеси. С ростом z максимум концентрации смещается к источнику. На уровне выброса примеси концентрация легких частиц монотонно убывает с увеличением x и максимума не наблюдается. Максимум снова наблюдается на более высоких уровнях.

Результаты исследования представлены на рисунке 1. Их анализ показал, что максимум по z на малых расстояниях наблюдается где-то на уровне источника и профиль концентрации по отношению к этому уровню почти симметричен. Наибольшая концентрация достигается на оси следа, а в поперечном направлении от нее концентрация убывает симметрично по экспоненциальному закону. Убывание замедляется при увеличении x .

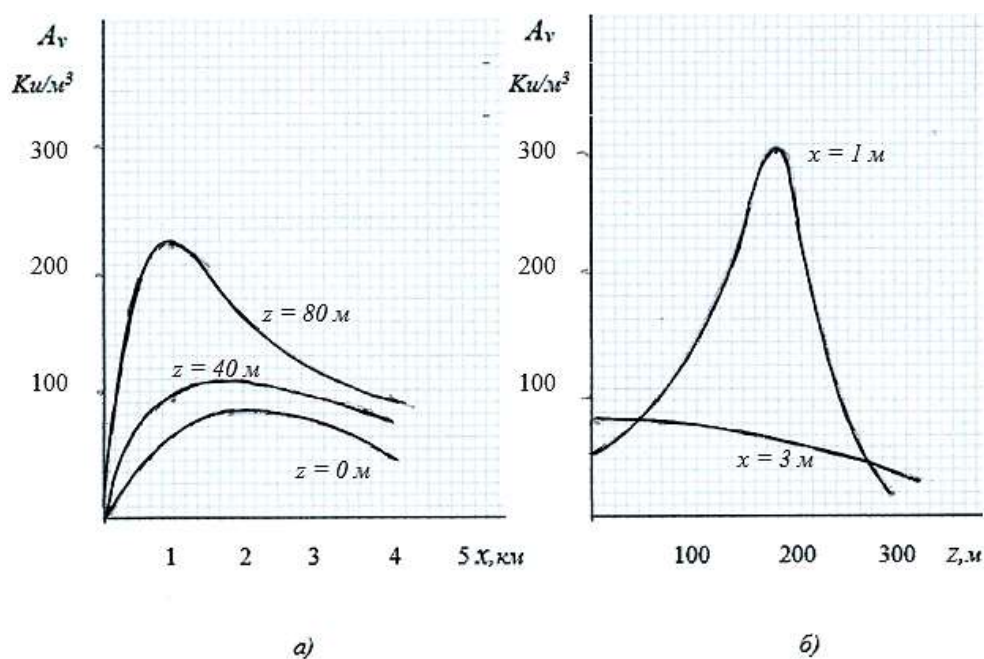


Рисунок 1 – Зависимость концентрации от расстояния и высоты источника: а – зависимость от x ; б – зависимость от z [Dependence of concentration on the distance and height of the source а – dependence on x ; б – dependence on z]

Кроме того, определенный вклад вносит разлет фрагментов разрушенной оболочки «грязной бомбы». Наличие оболочки следует ожидать, так как в данном случае ГБ изготавливается на государственных объектах [5]. Рассмотрим характер разрушения различных оболочек.

Выражение (15) для определения начальной скорости разлета в дифференциальной форме [13]:

$$U \frac{dU}{dr} = \frac{\beta}{1 + n_1 \beta} f\left(\frac{1}{r^{N-k}}\right) S^*(r), \quad (15)$$

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

безразмерные переменные: $r = R / R_0$; $\beta = m_{BB} / m_{об}$; $U = v / D$; $f = \frac{\rho_{BB} R_0}{2m_{BB}(k+1)}$;

$S^* = S / S_0$; S_0 – начальная площадь контакта оболочки и продуктов взрыва; S – площадь контакта оболочки и продуктов взрыва; k – показатель изоэнтропии продуктов детонации; R_0 – радиус исходного заряда; D – скорость детонации; $m_{об}$ – масса оболочки, участвующая в образовании фрагментов осколочного поля.

Сплошная оболочка. Расширение происходит от известного начального R_0 до некоторого текущего значения радиуса R , при котором она начинает разрушаться на отдельные фрагменты. Тогда в выражении (13) для цилиндра $S = 2\pi R$, а для сферы $S = 4\pi R^2$.

Организованное дробление. Разрушение оболочки начинается практически сразу в момент начала ее расширения. В этом случае площадь контакта оболочки и продуктов детонации практически не меняется, т.е. в формуле (13) для цилиндра $S = 2\pi R$, а для сферы $S = 4\pi R_0^2$.

Расширение гофрированной оболочки. Из-за деформации самих фрагментов оболочки площадь контакта с расширяющимися продуктами детонации уменьшается до некоторой величины. Поэтому S представим в виде убывающих функций для цилиндра $S = 2\pi R_0 (R_0 / R)$ и для сферы $S = 4\pi R_0^2 (R_0 / R)$.

С учетом вышеизложенного, интегрирование уравнения (13) дает общее выражение для определения начальной скорости фрагментов оболочки [13]. В таблице 1 приведены выражения для определения значений U .

Таблица 1 – Выражения для определения U [Expressions for defining U]

Тип дробления	Распределение скорости ПД n	Симметрия		
		плоская $N = 1$	цилиндрическая $N = 2$	сферическая $N = 3$
1	линейное $n = 1$	$D\sqrt{3\beta/(3+\beta)}/\sqrt{8}$	$D\sqrt{\beta/(2+\beta)}/\sqrt{2}$	$D\sqrt{5\beta/(5+3\beta)}/\sqrt{8}$
	параболическое $n = 2$	$D\sqrt{5\beta/(5+\beta)}/\sqrt{8}$	$D\sqrt{3\beta/(3+\beta)}/\sqrt{8}$	$D\sqrt{7\beta/(7+3\beta)}/\sqrt{8}$
2	линейное $n = 1$	$D\sqrt{3\beta/(3+\beta)}/\sqrt{8}$	$D\sqrt{\beta/(2+\beta)}/\sqrt{5}$	$D\sqrt{15\beta/(5+3\beta)}/\sqrt{32}$
	параболическое $n = 2$	$D\sqrt{5\beta/(5+\beta)}/\sqrt{8}$	$D\sqrt{3\beta/(3+\beta)}/\sqrt{10}$	$D\sqrt{21\beta/(7+3\beta)}/\sqrt{40}$
3	линейное $n = 1$	$D\sqrt{3\beta/(3+\beta)}/\sqrt{8}$	$D\sqrt{\beta/(2+\beta)}/\sqrt{6}$	$D\sqrt{15\beta/(5+3\beta)}/\sqrt{40}$
	параболическое $n = 2$	$D\sqrt{5\beta/(5+\beta)}/\sqrt{8}$	$D\sqrt{3\beta/(3+\beta)}/\sqrt{12}$	$D\sqrt{21\beta/(7+3\beta)}/\sqrt{40}$

В ходе выполнения одной из НИР была создана прикладная программа «Грязнуха», предназначенная для предварительной оценки характера зоны радиоактивного загрязнения местности при взрыве гипотетической «грязной» бомбы. На рисунке 2б представлен один из результатов моделирования радиоактивного загрязнения местности с учетом данного рельефа и конкретных (принятых для расчета)

метеорологических условий. При грамотной организации взрыва реальные значения начальной скорости фрагментов оболочки будут находиться в диапазоне 1000÷5500 метров в секунду. Знаками Δ обозначена граница зоны максимально возможного разлета фрагментов оболочки ГБ. Стоит отметить, что результаты моделирования носят оценочный характер. Фактические зоны радиоактивного загрязнения, если такое случится, уточняются по результатам радиационной разведки.

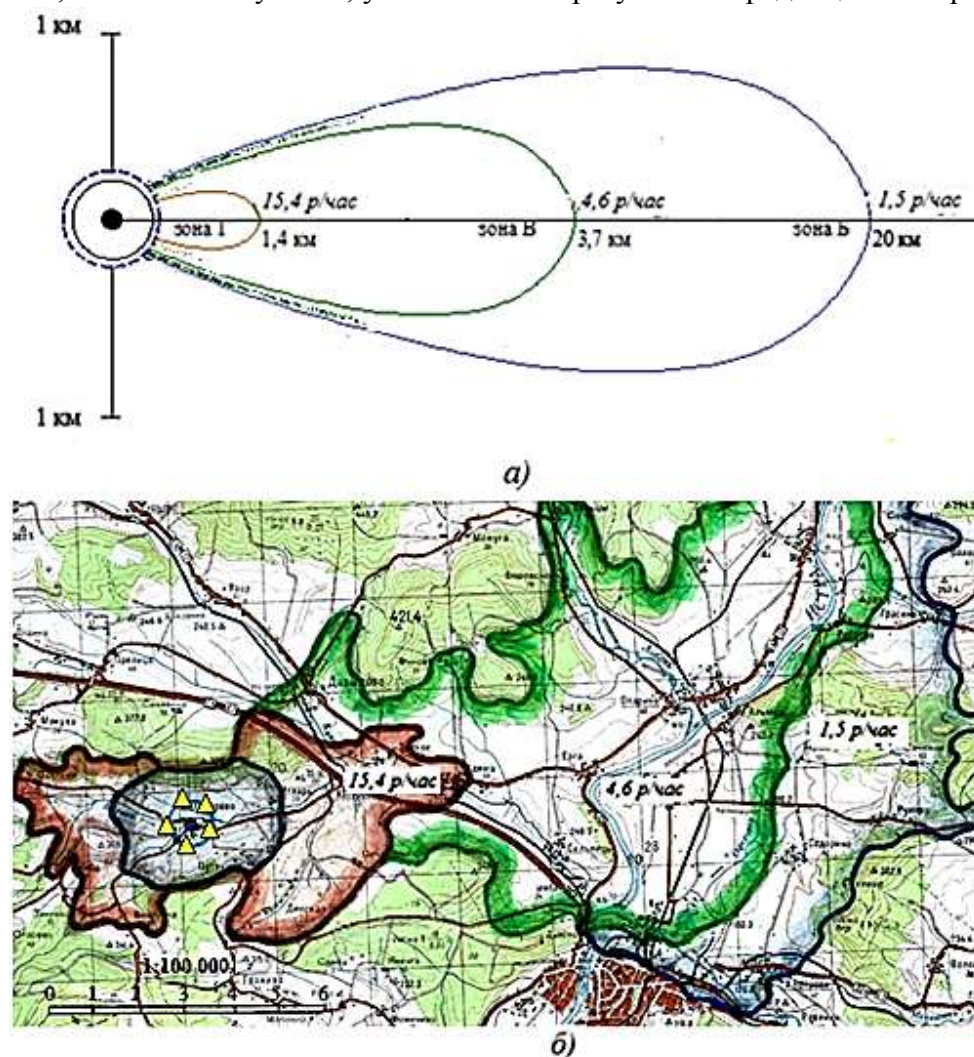


Рисунок 2 – Вариант примерного характера зоны радиоактивного загрязнения местности: *а* – след облака при неизменном направлении ветра без учета рельефа местности; *б* – результат моделирования с учетом рельефа местности при переменном ветре и атмосферных осадках (дождь) [Variant of the approximate nature of the area of radioactive contamination: *a* – the trail of a cloud with a constant wind direction without taking into account the terrain; *b* – the result of modeling taking into account the terrain with variable wind and precipitation (rain)]

Программа прошла апробацию в ходе тренировок аварийной команды. Сначала проводилась комплексная разведка места «взрыва» и прилегающей местности с кино- и фотосъемками. На основании полученного материала создавалась 3D модель местности, которая вместе с метеоусловиями (на момент «взрыва») использовалась в соответствующих расчетах. Полученные результаты поступали для уточнения границ зон заражения в ходе дозиметрического контроля.

Распространение тяжелой примеси имеет свои особенности, вызванные существенной скоростью осаждения [14]. При малых значениях x с увеличением скорости падения частиц концентрация примеси будет расти, а при больших убывает, причем интенсивность повышается с увеличением x . При этом для тяжелой примеси

максимум концентрации больше, а соответствующее ему расстояние до источника меньше, чем для легкой примеси [3, 8].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Hoodbhoy P., Mian Z. Nuclear battles in South Asia // The Bulletin of the Atomic Scientists, May 4, 2016, <http://thebulletin.org/nuclear-battles-south-asia9415>.
2. Hans M. Kristensen & Robert S. Norris. North Korean nuclear capabilities, 2018, Bulletin of the Atomic Scientists, Vol.74, No.1, 41-51, <https://www.tandfonline.com/loi/rbul20>
3. Кириллов, В.М. Физические основы радиационной и ядерной безопасности / В.М. Кириллов – Москва : РВСН, 1992. – 212 с.
4. Денисов, О.В. Комплексная безопасность населения и территорий в чрезвычайных ситуациях. Проблемы и решения : монография / О.В. Денисов, О.А. Губеладзе, Б.Ч. Месхи, Ю.И. Булыгин; под общей редакцией Ю.И. Булыгина. – Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2016. – 278 с.
5. Губеладзе, О.А. К вопросу обоснования необходимости прикрытия объектов использования атомной энергии от ударов с воздуха / О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 4(45). – С. 15-24.
6. Губеладзе, О.А. Диффузия примеси при мгновенном выбросе из точечного источника в случае реализации пессимистического сценария развития аварийной ситуации / О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 1(42). – С. 24-30.
7. Михайлов, В.Н. Безопасность ядерного оружия России / В.Н. Михайлова. – Москва : Мин. по атомной энергии – 1998. – 148 с.
8. Гусев, Н. Г. Радиоактивные выбросы в биосфере / Н.Г. Гусев, В.А. Беляев – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
9. Богатов, В.А. Форма и характеристики частиц топливного выброса при аварии на Чернобыльской АЭС / В.А. Богатов, А.А. Боровой, Ю.В. Дубасов, В.В. Ломоносов // Атомная энергия. – Июль 1990. – Том 69. – Вып. I. – С. 36-40.
10. Raabe O.I., Goldmau M.A. Predictivo madel ufearbey moctality following acute inhalation of Pu₂ oxide. Radiation research 78, 1979.
11. Ключников, А.А. Морфология частиц ядерного топлива чернобыльского выброса / А.А. Ключников, В.Б. Рыбалка, Г.И. Петелин, Ю.И. Зимин // Первый независимый научный вестник. – 2016. – № 4. – С. 82-88.
12. Орленко, Л.П. Физика взрыва и удара / Л.П. Орленко – Москва : Физматлит, 2008. – 304 с.
13. Губеладзе, О.А. Оценка последствий воздействия кинетических ударников на взрывоопасный объект с малогабаритной ядерной энергетической установкой / О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 3(32). – С. 33-40.
14. Губеладзе, О.А. Экспресс-оценка результатов нерегламентированных деструктивных воздействий на ядерно- и радиационноопасный объект / О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2018. – № 4. – С. 24-30.

REFERENCES

- [1] Hoodbhoy P., Mian Z. Nuclear battles in South Asia // The Bulletin of the Atomic Scientists, May 4, 2016, <http://thebulletin.org/nuclear-battles-south-asia9415> (in English).
- [2] Hans M. Kristensen & Robert S. Norris (2018) North Korean nuclear capabilities, 2018, Bulletin of the Atomic Scientists, Vol.74, No.1, 41-51, <https://www.tandfonline.com/loi/rbul20>(in English).
- [3] Kirillov V.M. Fizicheskie osnovy radiatsionnoy i yadernoy bezopasnosti [Physical Bases of Radiation and Nuclear Safety]. Moscow, RVSН, 1992, 212 p. (in Russian).
- [4] Denisov O.V., Gubeladze O.A., Meskhi B.Ch., Bulygin Yu.I. Kompleksnaya bezopasnost` naseleniya i territorij v chrezvy`chajny`x situacijax. Problemy` i resheniya: monografiya [Complex Safety of the Population and Territories in Emergency Situations. Problems and Solutions]. Rostov-on-Don, Publishing center Don State Technical University, 2016, 278 p. (in Russian).
- [5] Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. K voprosu obosnovanija neobhodimosti prikrityja ob`ektov ispolzovanija atomnoj energii ot udarov s vozduha [Issue of Substantiating the Need to Cover Atomic Energy Objects from Air Strikes], Global`naya yadernaya bezopasnost` [Global Nuclear Safety], 2022, No. 4(45), pp. 15-24 (in Russian).
- [6] Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. Diffuzija primesi pri mgnovenном vybrose iz tochechnogo istochnika v sluchae realizacii pessimisticheskogo szenarija razvitija avarijnoj situacii [Impurity Diffusion at Instantaneous Outburst from a Point Source in Worst-Case Emergency Scenario

- Realization] Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2022. No.1 (42). P. 24-30 (in Russian).
- [7] Mikhaylov V.N. Bezopasnost' yadernogo oruzhiya Rossii [Safety of Nuclear Weapon of Russia]. Moscow, Min. po atomnoy energii [Ministry of Nuclear Energy], 1998, 148 p. (in Russian).
- [8] Gusev N.G., Belyaev V.A. Radioaktivnye vybrosy v biosfere [Radioactive Emissions in the Biosphere]. Moscow, Energoatomizdat [Energoatomizdat], 1991, 256 p. (in Russian).
- [9] Bogatov V.A., Borovoy A.A., Dubasov Yu.V., Lomonosov V.V. Forma i harakteristiki chastic toplivnogo vybrosa pri avarii na Chernobyl'skoj AES [The Shape and Characteristics of Fuel Release Particles in the Chernobyl Accident], Atomnaja energija [Nuclear Power], July 1990. Volume 69, Issue 1, pp. 36-40 (in Russian).
- [10] Raabe O.I., Goldmau M.A. Predictivo model ufearbey moctality following acute inhalation of Pu₂ oxide. Radiation research 78, 1979 (in English).
- [11] Kljutchnikov A.A., Fishing V.B., Petelin G.I., Zimin Yu.I. Morfologija tchastic jaderno topliva chernobyl'skogo vybrosa [Chernobyl Pollution Nuclear Fuel Particles. Morphology], Pervyj nezavisimyj nauchnyj vestnik [First independent scientific journal], 2016, No. 4, pp. 82-88 (in Russian).
- [12] Orlenko L.P. Fizika vzryva i udara: Uchebnoe posobie dlya vuzov [Physics of Explosion and Blow: Manual for Higher Education Institutions]. Moscow, Fizmatlit, 2008, 304 p. (in Russian).
- [13] Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. Ozenka posledstvij vozdeystvija kineticheskix udarnikov na vzryvoopasnyj ob'ekt s malogabaritnoj jadernoj energeticheskoj ustanovkoj [Assessment of the Influence Consequence of Kinetic Impactors at an Explosive Object with a Small Nuclear Power Plant], Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety], 2019, No. 3(32), pp. 33-40 (in Russian).
- [14] Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. Express-otsenka rezul'tatov nereglementirovannykh destruktivnykh vozdeystviy na yaderno- i radiatsionnoopasnyy ob'ekt [Express Assessment of Results of Independent Destructive Impacts on Nuclear and Radiation-Hazardous Object], Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety], 2018, No. 4(29), pp. 24-30 (in Russian).

Area Contamination Due to Dry Settling and Point Source Stack Effluents Washout by Precipitates

© Oleg A. Gubeladze¹, Avtandil R. Gubeladze²

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

¹*buba26021966@yandex.ru, ORCID iD: 0000-0001-6018-4989, WoS ResearcherID: F-6921-201*

²*buba26021966@yandex.ru, ORCID iD: 0000-0002-6966-6391, WoS ResearcherID: F-7215-201*

Received by the editorial office on 12/12/2022

After revision on 02/13/2023

Accepted for publication 02/21/2023

Abstract. The article deals with an accidental situation development final stage accompanied by a powder explosion (combustion) incoming to a nuclear weapon part or dirty bomb and fissile nuclear materials dispergation with discharge in the air. The Formulas for impurity level express assessment fallen to the earth surface due to dry settling and stack effluents washout by precipitates are given.

Keywords: small-sized nuclear power plant, source of radioactive contamination, dispersion, emission cloud, impurity concentration, full exposure.

For citation: Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. Area Contamination Due to Dry Settling and Point Source Stack Effluents Washout by Precipitates // Global Nuclear Safety. 2023. No. 1(46). P. 14-22 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2023-01-02>.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 621.039.586 : 621.039.517
DOI 10.26583/gns-2023-01-03
EDN KVNDOP

**ПРОБЛЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИИ
КРЕСТООБРАЗНЫХ ВИТЫХ ТВЭЛОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ
ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ**

© 2023 Андрей Михайлович Киркин¹, Антон Владимирович Курындин²,
Сергей Владимирович Синегрибов³, Арсений Олегович Смирнов⁴,
Валерий Михайлович Хлобыстов⁵

Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Россия

¹kirkin@secnrs.ru

²kuryndin@secnrs.ru

³sinegribov@secnrs.ru

⁴asmirnov@secnrs.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2877-051X>

⁵hlobystov@secnrs.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5491-2126>

Аннотация. При построении расчетных моделей процессов, влияющих на безопасность объектов использования атомной энергии, в соответствии с требованиями федеральных норм и правил в области использования атомной энергии, должны быть обоснованы выбранные методы моделирования, а также принятые приближения и допущения. В работе рассмотрены вопросы учета особенностей моделирования геометрии крестообразных витых ТВЭлов с использованием нодализационных программ для ЭВМ, а также возможные подходы к описанию геометрии таких ТВЭлов при проведении теплогидравлических расчетов. В работе определен приоритетный метод задания геометрии, который позволяет корректно учесть максимальное значение теплового потока с поверхности оболочки крестообразного ТВЭла при расчете температур в активной зоне и возможность наступления кризиса теплообмена на поверхности таких ТВЭлов при нарушениях нормальной эксплуатации.

Ключевые слова: безопасность реакторных установок, приближения и допущения, теплогидравлический расчет, витой крестообразный ТВЭл, важные для безопасности процессы, нодальное построение расчетной области.

Для цитирования: Киркин А.М., Курындин А.В., Синегрибов С.В., Смирнов А.О., Хлобыстов В.М. Проблема моделирования геометрии крестообразных витых ТВЭлов при проведении теплогидравлических расчетов // Глобальная ядерная безопасность. – 2023. – № 1(46). – С. 23-35 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2023-01-03>.

Поступила в редакцию 08.12.2022

После доработки 09.02.2023

Принята к печати 21.02.2023

Введение

Развитие технологий в области использования атомной энергии привело к появлению технически и геометрически сложных уникальных систем, обоснование безопасности которых невозможно проводить аналитическими методами. При этом инструментарий программ для электронных вычислительных машин (далее – ЭВМ) не всегда в достаточной мере способен удовлетворить потребности, возникающие при построении расчетных моделей. Невозможность точно задать геометрию системы при построении расчетной модели приводит к использованию допущений и приближений. В результате возникает дополнительная составляющая погрешности расчета по программам для ЭВМ, обусловленная неопределенностями, вносимыми принятыми допущениями и приближениями, в том числе связанными с упрощенным представлением расчетной области исследуемой реальной системы.

Требования о необходимости учета таких составляющих погрешности расчета отражены в действующих нормативных правовых документах Российской Федерации в области использования атомной энергии. Например, требованиями п. 1.2.9 НП-001-15 [1] установлена необходимость проведения оценок погрешностей и неопределенностей результатов расчетов при выполнении анализа безопасности атомных станций. Кроме того, при построении расчетных моделей процессов, влияющих на безопасность объекта использования атомной энергии, в соответствии со статьей 26 Федерального закона от 21.11.1995 № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» [2] должны использоваться программы для ЭВМ, прошедшие экспертизу в установленном порядке [3]. При этом, согласно [3], должна быть обоснована применимость методов математического моделирования, заложенных в программу для ЭВМ. Также в [3] установлено требование о необходимости обоснования методики оценки погрешностей и неопределенностей результатов расчетов.

В соответствии с требованиями п. 1.2.4 НП-001-15 [1], наступление пороговых эффектов должно исключаться всеми доступными мерами в связи с возможностью скачкообразного ухудшения безопасности реакторной установки при небольшом изменении рабочих параметров [1]. Наступление кризиса теплообмена является одним из наиболее значимых пороговых эффектов, который может привести к быстрому и значительному повреждению твэлов сверх проектных пределов. Таким образом, при проектировании и обосновании безопасности ядерного реактора требуется проведение анализа возможности наступления пороговых эффектов при нормальной эксплуатации и нарушениях нормальной эксплуатации, с целью разработки технических и организационных мер, направленных на исключение повреждений ядерного топлива.

В данной статье рассмотрено влияние использования различных приближений при создании геометрической модели витого крестообразного твэла на расчетную реализацию пороговых процессов при моделировании различных режимов работы ядерного реактора.

Постановка задачи исследования

Выбор для анализа пучка крестообразных твэлов обусловлен высокой энергонапряженностью объемов активных зон реакторов с крестообразными твэлами и гипотетической возможностью наступления исходных событий, приводящих к скачкообразному ухудшению теплоотвода и наступлению кризиса теплообмена. При этом функционал широко используемых для моделирования теплогидравлических процессов нодализационных программ для ЭВМ зачастую не позволяет точно учитывать геометрию твэлов с крестообразным поперечным сечением. Поэтому при разработке расчетной модели крестообразных твэлов с использованием таких программ

вводятся дополнительные допущения и приближения, по возможности, наиболее точно отражающие свойства реальной геометрии исследуемого объекта в заданных режимах работы.

В существующих реакторных установках, активные зоны которых выполнены с использованием крестообразных ТВЭлов, достигаются высокие тепловые потоки с поверхностей оболочек ТВЭлов. В частности, ТВЭлы такой геометрии используются в активных зонах исследовательских реакторов РБТ-6, РБТ-10/2, СМ-3 и ПИК. Среднее объемное энерговыделение в активной зоне таких ядерных реакторов может достигать 2 МВт/л, при этом неравномерность распределения по объему активной зоны составляет 5,6, в результате чего максимальный тепловой поток (средний по периметру) с поверхности крестообразного ТВЭла достигает 15 МВт/м² [4]. Следует отметить, что достижение кризиса теплообмена на поверхности крестообразных ТВЭлов оказывает разрушающий эффект и может приводить к плавлению ТВЭлов и, как следствие, выходу радиоактивных веществ. В связи с этим в федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии, в том числе в п. 2.3.3.19 НП-082-07 [5], п. 1.2 Приложения № 3 к НП-049-17 [6] и п. 7.2.4.2 НП-006-16 [7], предусмотрены требования о необходимости включения в проект реакторной установки средств оперативного расчета запаса до кризиса теплообмена и необходимости указания в отчетах по обоснованию безопасности сведений о минимальном коэффициенте запаса до кризиса теплообмена при нормальной эксплуатации реакторной установки.

В настоящей работе исследовано влияние выбора допущений и приближений при моделировании пучка витых крестообразных ТВЭлов в рамках проведения вариантных теплогидравлических расчетов с использованием нодализационной программы для ЭВМ APROS 6 [8, 9] и ее возможностей. Результаты работы в дальнейшем могут быть использованы при проведении численных расчетов аварийных режимов, в том числе режимов, связанных с вводом избыточной реактивности и течью теплоносителя первого контура, эксплуатируемых и перспективных реакторов, в том числе для атомных станций малой мощности.

Общее описание программы для ЭВМ APROS

Как отмечено выше, в качестве расчетного инструментария выбрана нодализационная программа для ЭВМ Advanced Process Simulation (APROS), которая получила широкое применение, как в области использования атомной энергии, так и в теплоэнергетике в целом. Программа APROS разработана Техническим исследовательским центром Финляндии VTT [10] и Финской государственной компанией Fortum [11]. APROS применяется, в том числе для автоматизации проектирования атомных станций и других объектов использования атомной энергии (далее – ОИАЭ), создания тренажеров различных ОИАЭ, а также позволяет моделировать переходные и аварийные процессы реакторных установок.

Процесс моделирования с помощью APROS отличается простотой задания исходных данных и граничных условий, а также удобным пользовательским интерфейсом с модулем визуализации, что позволяет быстро создавать оптимальные расчетные модели.

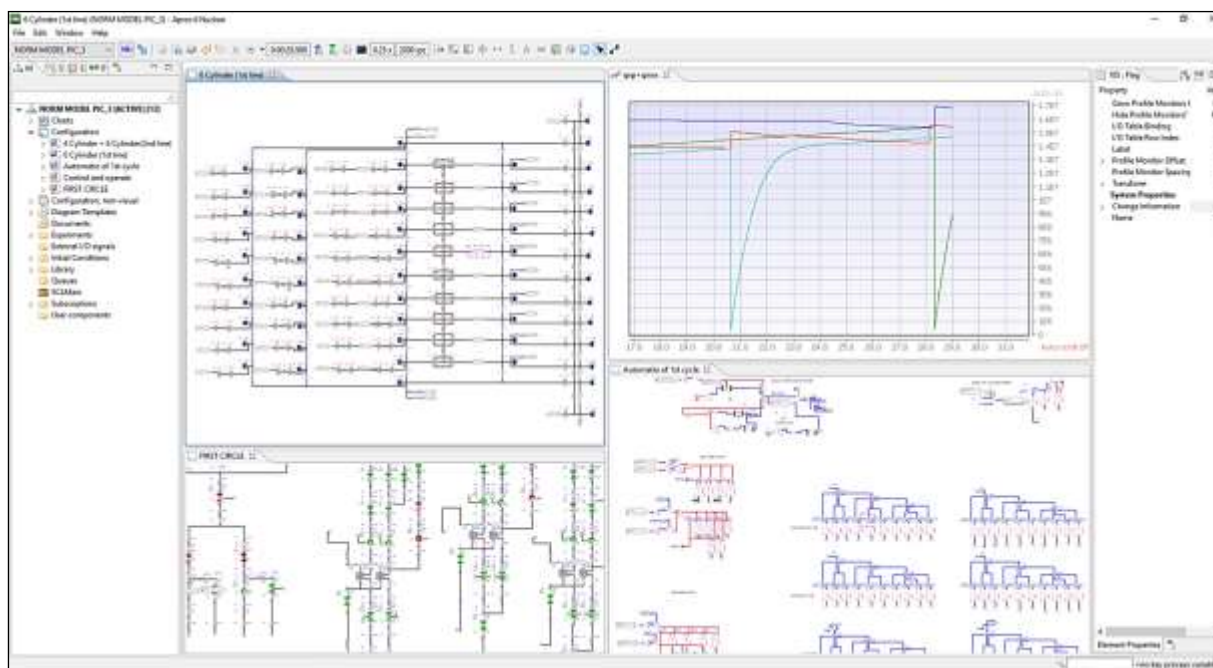


Рисунок 1 – Интерфейс программы для ЭВМ APROS [Interface of the APROS]

Применяемое в программе для ЭВМ APROS нодальное задание геометрии способствует достижению оптимального соотношения затрачиваемых вычислительных ресурсов и точности проведения расчетов. Кроме того, широкий набор готовых элементов библиотеки APROS позволяет существенно ускорить процесс построения расчетных моделей реакторных установок. При этом в APROS не ограничены возможности моделирования процессов на расчетном уровне, что позволяет разработчику модели определять собственные расчетные зависимости некоторых параметров, а также вносить корректировки в заложенные в APROS характеристики материалов и оборудования. Иерархический подход к комплексному моделированию позволяет организовать работу с программой оптимальным для разработчика образом.

Стоит отметить, что программа для ЭВМ APROS уже широко применяется при оценке безопасности ядерных установок. Так, например, в работе [12] показана возможность моделирования мокрого хранилища отработавшего ядерного топлива с использованием программы APROS, при этом сформулирован вывод о необходимости учета неопределенности в исходных данных при проведении таких расчетов.

Многолетний опыт использования APROS при проведении расчетов в области использования атомной энергии отражен в отчетах организаций-пользователей программы (например, в [13]), где приводятся результаты верификации и валидации программы в области проведения теплогидравлических расчетов процессов, влияющих на безопасность реакторных установок в различных режимах их эксплуатации.

Расчетная модель витого крестообразного твэла

Как и в большинстве аналогичных программ для ЭВМ, моделирование конструкционных элементов реакторных установок в программе APROS реализуется наборами объектов, ограниченных тремя типами поверхностей: параллелепипед, цилиндр и сфера. Инструментальные ограничения приводят к необходимости использования при расчетах допущений и приближений. В данной работе учтена специфика построения геометрической модели витого крестообразного твэла и проведен анализ влияния выбора модели твэла.

Для оценки неравномерности теплового потока с поверхности твэла проведен предварительный расчет с использованием программы для ЭВМ ANSYS [14]. В

предварительном расчете решалась задача сопряженного теплообмена в теплоносителе и теплопроводности в наиболее энергонапряженном твэле. Была разработана модель ячейки витого крестообразного твэла в форме шестиугольной призмы, включающая топливную композицию, оболочку витого крестообразного твэла и теплоноситель. Для модели заданы термодинамические свойства материалов топливной композиции и оболочки, удельное тепловыделение в топливной композиции в зависимости от высоты, расход теплоносителя через ячейку, температура теплоносителя и давление на входе в расчетную область. Расчет осуществлялся в приближении бесконечно повторяющихся расчетных ячеек – для противоположных боковых граней призмы были заданы периодические граничные условия, описанные в [15]. Для решения задачи использовалась сетка с 7 миллионами элементарных ячеек. Решение получено с использованием стандартной К-ε модели турбулентности.

В результате решения задачи были получены температурные поля в твэле и теплоносителе, а также поля скорости теплоносителя. Расчет температуры и распределения теплового потока на поверхности крестообразного твэла выполнен при энерговыделении, соответствующем энерговыделению в активной зоне исследовательского реактора ПИК при эксплуатации на номинальном уровне мощности [16].

Расчет показал, что разница в значениях максимального и минимального теплового потока (который напрямую влияет на температуру на поверхности твэла) на одной высоте составляет 1,4, а кризис теплообмена будет реализовываться в первую очередь на вогнутой части твэла (рис. 2). Наиболее простым способом учета полученного коэффициента неравномерности теплового потока по периметру витого крестообразного твэла при его моделировании с использованием цилиндрических поверхностей является уменьшение теплопередающей поверхности твэла пропорционально величине определенной неравномерности (в 1,4 раза).

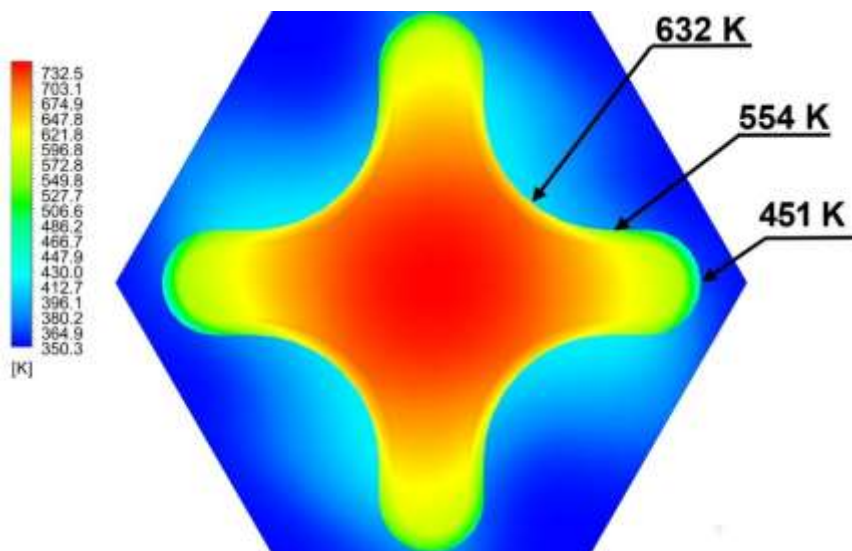


Рисунок 2 – Распределение температуры по периметру оболочки витого крестообразного твэла (в середине твэла длиной 0,5 м) [Temperature distribution along the perimeter of the cladding of twisted fuel rod with x-type cross section (in the middle of a 0.5 m long fuel rod)]

В результате в рамках работы рассмотрена возможность использования при моделировании витого крестообразного твэла следующих приближений (рис. 3):

- цилиндр с сохранением площади поверхности теплообмена (объем топливной композиции увеличен) (позиция «а» рис. 3);
- два цилиндра с сохранением общей площади теплообменной поверхности и объема топливной композиции (позиция «б» рис. 3);

- цилиндр с уменьшенной площадью теплообмена в 1,4 раза (объем топливной композиции увеличен) (позиция «в» рис. 3);
- полый цилиндр с сохранением площади поверхности теплообмена и объема топливной композиции (позиция «г» рис. 3);
- полый цилиндр с уменьшенной площадью теплообмена в 1,4 раза и сохранением объема топливной композиции (позиция «д» рис. 3).

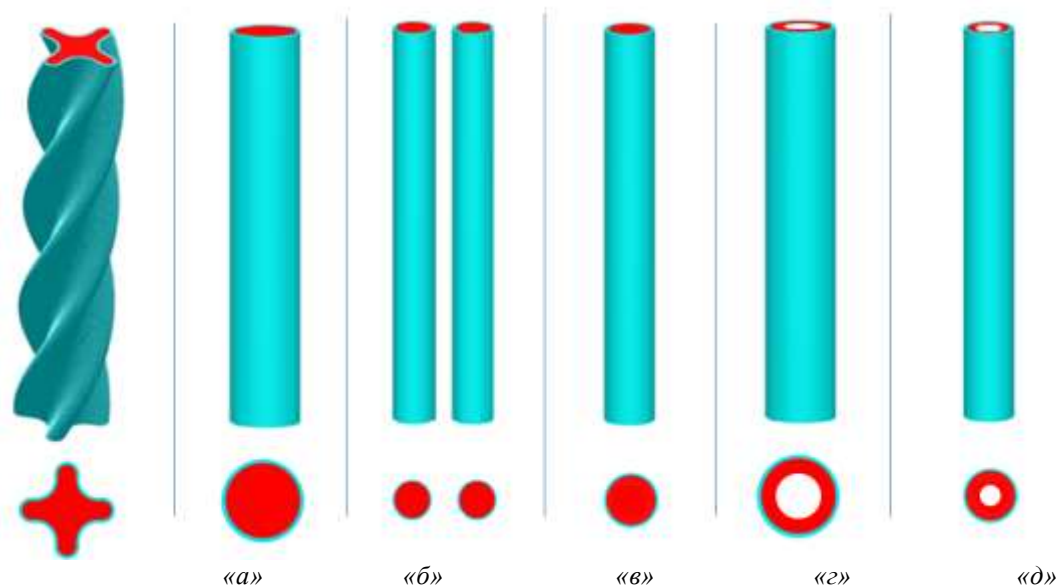


Рисунок 3 – Исследуемые модели крестообразного твэла [Tested models of twisted fuel rod with x-type cross section]

Модели крестообразных твэлов в виде полых цилиндров для нейтронно-физических расчетов широко применяются при расчете критических параметров активных зон, например, в [17, 18]. Основная особенность крестообразного твэла, которая должна быть учтена в теплогидравлическом расчете, – это неравномерность теплового потока по периметру твэла, в результате которой, согласно [15], азимутальная неравномерность температуры поверхности оболочки крестообразного твэла при среднем тепловом потоке $3,9 \text{ МВт/м}^2$ может достигать $35 \text{ }^\circ\text{C}$. Моделирование полым цилиндром проведено с учетом неравномерности по периметру теплового потока с поверхности крестообразных твэлов. На внутренней границе полого цилиндра установлено условие тепловой изоляции.

Расчетная модель активной зоны и первого контура реактора, разработанная в целях проведения исследования, включает только те элементы, которые необходимы для сравнения различных вариантов приближения. Так, выполнено моделирование пучка твэлов, состоящего из 241 топливного элемента и чехла толщиной 1,5 мм [19, 16]. В разработанной нодализированной модели твэлы разбиты на 10 слоев в аксиальном направлении с учетом неравномерности распределения энерговыделения по высоте твэла. Также учитывается радиальная неравномерность энерговыделения в ТВС.

Оценка моделей пучка витых крестообразных твэлов

С целью учета влияния выбранных приближений на результаты расчетов и оценки корректности применения различных моделей крестообразного твэла для создания расчетных моделей ядерных реакторов, проведены расчеты стационарной работы на мощности с использованием каждой модели.

Также были проведены оценочные расчеты влияния неопределенности исходных данных на результаты расчета критических параметров, как при нормальной эксплуатации, так и при авариях, приводящих к возникновению пороговых эффектов. Так, с учетом изложенных в [20, 21] подходов был конкретизирован перечень варьируемых параметров, для которых оценивалось влияние на реализацию теплогидравлических процессов и проявления пороговых эффектов. В качестве варьируемых параметров помимо геометрических параметров твэла были выбраны: характеристики насосов, неравномерность теплофизических параметров твэла по объему рассматриваемого пучка твэлов, неравномерность энерговыделения по высоте твэлов, параметры теплоносителя. В рамках данного исследования на основе требований по обеспечению безопасности ОИАЭ, имеющейся в открытом доступе информации о параметрах нормальной эксплуатации ядерных реакторов, в активных зонах которых используются крестообразные твэлы, выбраны интервалы возможных изменений варьируемых параметров. Наиболее вероятные значения параметров и интервалы их изменений приведены в таблице 1. В связи с отсутствием информации о реальном распределении вероятности изменения параметров в пределах погрешности, в рамках настоящей работы принято, что распределение вероятности для всех варьируемых параметров является нормальным.

Таблица 1 – Варьируемые параметры, принятые для проведения исследования [Variable parameters adopted for the study]

Параметр	Наиболее ожидаемое значение	Диапазон изменения
Толщина оболочки твэла	0,15 мм	$\pm 15\%$
Эквивалентный диаметр топливной части твэла	5,08 мм	$\pm 10\%$
Теплопроводность оболочки твэла	18 Вт/(м °C)	$\pm 10\%$
Теплопроводность топлива	118 Вт/(м °C)	$\pm 10\%$
Давление на входе в пучок	5 МПа	$\pm 5\%$
Расход теплоносителя	35 кг/с	$\pm 5\%$
Коэффициент неравномерности энерговыделения по высоте	1,66	$\pm 10\%$
Мощность пучка твэлов	9,011 МВт	$\pm 5\%$
Температура питательной воды	50°C	$\pm 5^\circ\text{C}$

Проведенные расчеты стационарной эксплуатации твэлов на номинальном уровне мощности показали значительный разброс температур крестообразного твэла в зависимости от используемой расчетной модели. Влияние учета неопределенностей исходных данных на максимальные значения температур оболочки твэла и ядерного топлива также проявляется достаточно сильно, но при этом значительно ниже различий, обусловленных выбором геометрии. Результаты расчетов параметров при нормальной эксплуатации на мощности приведены в таблице 2. При сравнении полученных в программе для ЭВМ APROS значений предельных температур оболочки твэлов и ядерного топлива с использованием упрощенных моделей твэла с результатами расчета, полученными в программе для ЭВМ ANSYS для реальной геометрии винтового твэла с крестообразным сечением, показана наилучшая сходимость результатов расчета в случае использования приближения полого цилиндра с уменьшенной площадью поверхности теплообмена в 1,4 раза и сохранением объема топливной композиции.

Таблица 2 – Вариационные расчеты эксплуатации крестообразного твэла на мощности [Variational calculations of the operation of the twisted fuel rods with x-type cross section at power]

Вариант моделирования витого крестообразного твэла	Максимальная температура внешней поверхности оболочки			Максимальная температура внутренней поверхности оболочки			Максимальная температура топливного сердечника		
	Наиболее вероятное значение, °K	Отклонение от ANSYS, °K	Относительное отклонение, %	Наиболее вероятное значение, °K	Отклонение от ANSYS, °K	Относительное отклонение, %	Наиболее вероятное значение, °K	Отклонение от ANSYS, °K	Относительное отклонение, %
Цилиндр с сохранением площади поверхности теплообмена	484,3	58,9	12,2	543	55,2	10,2	676,9	16,3	2,4
Цилиндр с уменьшенной площадью теплообмена в 1,4 раза	527,3	15,9	3,0	608,9	10,7	1,8	741,1	47,9	6,5
Два цилиндра с сохранением общей площади теплообмена	477,9	65,3	13,7	537	61,2	11,4	604,8	88,4	14,6
Полый цилиндр с сохранением площади теплообмена и объема топливной композиции	483,7	59,5	12,3	541,9	56,3	10,4	570,2	123	21,6
Полый цилиндр с уменьшенной площадью поверхности теплообмена в 1,4 раза и сохранением объема топливной композиции	527,9	15,3	2,9	605,1	6,9	1,1	670,2	23	3,4

Кроме того, в работе анализируется влияние выбора модели на результаты расчетов аварийных процессов, приводящих к линейному увеличению мощности пучка твэлов (реакторной установки). Рост мощности, как правило, связан с вводом положительной реактивности в результате тех или иных отказов оборудования или ошибок персонала, однако на данном этапе исследования нет необходимости уточнения причины роста мощности, так как это в значительной степени связано с конструкцией конкретной ядерной установки. При этом полученные в рамках настоящего исследования результаты в дальнейшем могут быть интерполированы на расчеты, выполненные в рамках анализа переходных процессов и аварийных режимов работы различных реакторных установок с топливом в виде винтовых твэлов с крестообразным сечением.

Для выполнения вариантных расчетов проведен случайный розыгрыш значений вариационных параметров, приведенных в таблице 1, согласно закону нормального распределения в границах вероятных значений и подготовлены группы исходных

данных (по 100 групп для каждого варианта упрощенной геометрии твэла). Далее группы значений параметров были использованы при проведении для каждой рассматриваемой в работе модели винтового крестообразного твэла серий расчетов достижения кризиса теплообмена.

В работе рассматривалось гипотетическое равномерное во времени увеличение мощности (энерговыведения) пучка твэлов со скоростью 0,01 %/с от начального значения, указанного в таблице 1, в результате исходного события с вводом положительной реактивности в активную зону реактора. Помимо температур достижения кризиса теплообмена (оболочки и топлива) одним из наиболее важных параметров, характеризующим аварийные процессы с ростом мощности реактора, является время достижения кризиса теплообмена. Это особенно актуально с точки зрения принятия мер по управлению аварийным процессом и аварийного реагирования в целом, что должно быть предусмотрено уровнями 4 и 5 глубоководной защиты любой ядерной установки. Для примера на рисунке 4 приведены зависимости температур топлива (T_f) и оболочки твэла с наибольшим тепловым потоком (внутренней $T_{об.вн}$ и наружной $T_{об.нар}$) при равномерном (по времени) увеличении энерговыведения в топливе для модели пучка винтовых крестообразных твэлов в приближении полого цилиндра. На рисунке 4 для наглядности также приведены точки достижения кризиса теплообмена, после которого начинаются процессы, сопровождающиеся изменением геометрии расчетной модели, и программные средства с нодальным заданием геометрии (такие как APROS) не позволяют получить достоверные результаты.

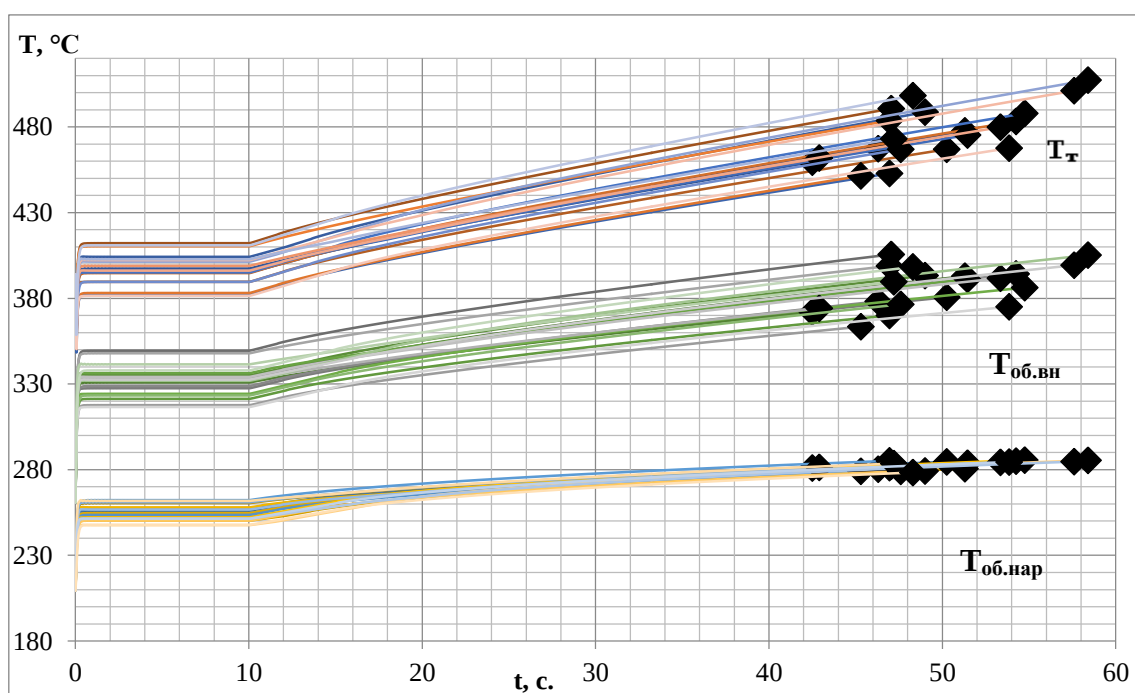


Рисунок 4 – Зависимости температур топлива и оболочки твэла от времени развития аварии в приближении полого цилиндра с уменьшенной площадью поверхности теплообмена в 1,4 раза и сохранением объема топливной композиции [The dependence of the fuel and fuel rod shell temperatures on the time of the accident development in the approximation of a hollow cylinder with a reduced heat exchange surface area by 1.4 times and the preservation of the volume of the fuel composition]

Результаты вариантного расчета демонстрируют высокую степень влияния приближений и допущений, используемых при построении расчетной модели крестообразных твэлов, а также неопределенностей исходных данных на корректность моделирования теплогидравлических процессов. Кроме того, по результатам проведения всех серий расчетов можно сделать вывод, что модель витого

крестообразного твэла в приближении полого цилиндра с уменьшенной поверхностью теплообмена в 1,4 обеспечивает наиболее полный учет особенностей моделирования крестообразных твэлов как при нормальной эксплуатации, так и при наиболее критичных аварийных процессах, связанных с возникновением пороговых эффектов.

Заключение

В работе продемонстрирован один из возможных подходов к обоснованию выбора принятых приближений и упрощений при проведении расчетов и оценке их влияния на результаты расчета на примере моделирования стационарных и нестационарных теплогидравлических процессов в пучке винтовых твэлов с крестообразным сечением.

Результаты выполненных исследований демонстрируют необходимость учета не только принятых при моделировании приближений и допущений, но и погрешностей и неопределенностей исходных данных, что в дальнейшем может быть использовано при установлении эксплуатационных пределов и пределов безопасной эксплуатации по параметрам, важным для протекания аварийных процессов и влияющим на возникновение пороговых эффектов.

Кроме того, в рамках исследования продемонстрирована возможность использования при моделировании витого крестообразного твэла геометрической модели в виде полого цилиндра с уменьшенной площадью поверхности теплообмена. В частности, показано, что такой вариант задания геометрии при ограниченных возможностях моделирования программных средств позволяет с достаточной степенью консервативности учесть особенности поведения критически важных теплогидравлических процессов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» НП-001-15. – Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 17 декабря 2015 г. № 522 (Зарегистрировано в Минюсте России 2 февраля 2016 г. № 40939). – URL: <https://demo.consultant.ru/cgi/online.cgi?req=doc&ts=QZ7X1WTqwes0df1L1&cacheid757D79A11537DD91CC95A49439B11454&mode=splus&rnd=CpsvQA&base=LAW&n=193587#vOBX1WTFH0egKby4> (дата обращения: 02.10.2022).
2. Федеральный закон от 21.11.1995 № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» (последняя редакция). – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/8503/page/1> (дата обращения: 02.10.2022).
3. Приказ Ростехнадзора от 30.07.2018 № 325 «Об утверждении Порядка проведения экспертизы программ для электронных вычислительных машин, используемых в целях построения расчетных моделей процессов, влияющих на безопасность объектов использования атомной энергии и (или) видов деятельности в области использования атомной энергии» (Зарегистрировано в Минюсте России 12.11.2018 № 52650). – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_310842/ (дата обращения: 02.10.2022).
4. Старков, В.А. Научно-методическое обоснование модернизации активной зоны реактора СМ : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / В.А. Старков. – Димитровград, 2015. – 37 с.
5. Постановление Ростехнадзора от 10.12.2007 № 4 «Об утверждении и введении в действие федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций» НП-082-07. – Утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 10 декабря 2007 г. № 4 (зарегистрировано Минюстом России 21 января 2008 г. № 10951; введены в действие с 1 июня 2008 г.). – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_74915/e35bcdcf3a4fdabe23d9304eefda2450263c025bb/ (дата обращения: 02.10.2022).
6. Приказ Ростехнадзора от 05.12.2017 № 528 «Об утверждении федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности исследовательских ядерных установок» (вместе с «НП-049-17. Федеральные

- нормы и правила...») (Зарегистрировано в Минюсте России 28.12.2017 № 49534). – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_286848/d118fed5f768a85d39c84b2cf9c8663f8374fb00/ (дата обращения: 02.10.2022).
7. Приказ Ростехнадзора от 13.02.2017 № 53 «Об утверждении федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности блока атомной станции с реактором типа ВВЭР» (вместе с «НП-006-16. Федеральные нормы и правила...») (Зарегистрировано в Минюсте России 10.05.2017 № 46663). – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_216808/63c778acb8500b291ec33add5211eadc85068dc7/ (дата обращения: 02.10.2022)/
 8. Apros 5.06. Thermal hydraulics reference guide. Thermal hydraulic nodes and branches. 2007.
 9. Apros 6 Feature Tutorial: by VTT and Fortum. Release: Apros 6.06, 10.03.2016.
 10. Официальный сайт VTT Technical Research Centre of Finland [Электронный ресурс]. – URL : <https://www.vttresearch.com/en> (дата обращения 23.09.2022).
 11. Официальный сайт Fortum [Электронный ресурс] – URL: <https://www.fortum.com> (дата обращения 23.09.2022).
 12. Учет неопределенности в исходных данных при проведении расчетов теплогидравлических характеристик мокрого хранилища ОЯТ с использованием программного средства APROS 6 / А.В. Курындин, А.А. Строганов, А.М. Киркин [и др.] // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных установок. – 2019. – № 2(16). – С. 21-37.
 13. Jukka Ylijoki, Sixten Norrman, Ari Silde, Pekka Urhonen. Research report. Validation of APROS version 5.14.11. VTT-R-00553-15.
 14. ANSYS 18.1 – Обновления и изменения. ANSYS, Inc., ЗАО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс», 2017 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.cadfem-cis.ru/media/ansys_2019r1_rus.pdf (дата обращения 23.09.2022).
 15. Чухлов, А.Г. Применение периодических граничных условий к теплогидравлическому расчету ТВС с оребренными твэлами / А.Г. Чухлов, В.П. Смирнов, С.Ю. Афонин // – Теплоэнергетика. – 2012. – № 2. – С. 44-50. – URL: https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv_nikiet2010.pdf (дата обращения 23.09.2022).
 16. Виноградов, М.К. Исследовательские ядерные установки государств-участников Содружества Независимых Государств / М.К. Виноградов, В.Н. Федюлин. – Москва : Гелиос АРВ, 2016. – 480 с.
 17. Новаков, И.Г. Учет неопределенностей в исходных данных при проведении расчетов эффективного коэффициента размножения активной зоны исследовательской ядерной установки / И.Г. Новаков, А.В. Курындин, А.М. Киркин, С.В. Маковский // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2020. – № 2. – С. 22-29.
 18. Быков, В.П. Исследование влияния замены крестообразного твэла на цилиндрическую модель в расчетах на критичность по программе MCU-5 / В.П. Быков, М.В. Иоаннисан // АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС». – URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms-2015/documents/kms2015-006.pdf> (дата обращения: 08.10.2022).
 19. Петров, Ю.В. Снижение концентрации урана в твэлах реактора ПИК / Ю.В. Петров, Л.М. Котова // Атомная энергия. – 2002. – Т. 93, № 2. – С. 117-120.
 20. Анализ чувствительности при моделировании тяжелых аварий с применением РК СОКРАТ/В / Д.Л. Гаспаров, А.В. Николаева, С.И. Пантюшин [и др.] // АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС». – URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2017/documents/mntk2017-161.pdf> (дата обращения: 07.10.2022).
 21. Об оценке погрешностей расчетов, выполняемых при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии / С.Н. Богдан, О.М. Ковалевич, Н.А. Козлова [и др.] // Ядерная и радиационная безопасность. – 2017. – № 2(84). – 16 с.

REFERENCES

- [1] Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj energii «Obshchie polozheniya obespecheniya bezopasnosti atomnyh stancij» NP-001-15[Federal Rules and Regulations in the Area of Atomic Energy Use «General Provisions for Nuclear Power Plant Safety Assurance» (NP-001-15)], URL: <https://demo.consultant.ru/cgi/online.cgi?req=doc&ts=QZ7X1WTqwes0df1L1&cacheid=757D79A11537DD91CC95A49439B11454&mde=splus&rnd=CpsvQA&base=LAW&n=193587#vOBX1WTFH0egKby4> (accessed 02.10.2022) (in Russian).
- [2] Federal'nyj zakon ot 21.11.1995 № 170-FZ «Ob ispol'zovanii atomnoj energii» [Federal Law No. 170-FZ of November 21, 1995 «Use of Atomic Energy»], URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/8503/page/1> (accessed 02.10.2022) (in Russian).
- [3] Order of Rostekhnadzor No. 325 of 30.07.2018 «Ob utverzhdenii Poryadka provedeniya ekspertizy programm dlya elektronnyh vychislitel'nyh mashin, ispol'zuemyh v celyah postroeniya raschetnyh

- modelей processov, vliyayushchih na bezopasnost' ob"ektov ispol'zovaniya atomnoj energii i (ili) vidov deyatel'nosti v oblasti ispol'zovaniya atomnoj energii» [«Approval of the Procedure for the Examination of Programs for Electronic Computing Machines Used for the Construction of Computational Models of Processes Affecting the Safety of Nuclear Energy Facilities and (or) Activities in the Field of Nuclear Energy Use»], URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_310842/ (accessed 02.10.2022) (in Russian).
- [4] Starkov, V.A. Nauchno-metodicheskoe obosnovanie modernizatsii aktivnoj zony reaktora SM [Scientific and Methodological Justification for the Modernization of the CM reactor Core], avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Doctor of Technical Sciences thesis abstract]. Dimitrovgrad, 2015, 37 p. (in Russian).
 - [5] Postanovlenie Rostekhnadzora ot 10.12.2007 № 4 «Ob utverzhdenii i vvedenii v dejstvie federal'nyh norm i pravil v oblasti ispol'zovaniya atomnoj energii «Pravila yadernoj bezopasnosti reaktornyh ustanovok atomnyh stancij» NP-082-07 [Federal Rules and Regulations in the Area of Atomic Energy Use «Nuclear Safety Rules for Reactor Installations of Nuclear Power Plants» (NP-082-07)], URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_74915/e35bcd3a4fdabe23d9304eefda2450263c025bb/ (accessed 02.10.2022) (in Russian).
 - [6] Prikaz Rostekhnadzora ot 05.12.2017 № 528 «Ob utverzhdenii federal'nyh norm i pravil v oblasti ispol'zovaniya atomnoj energii «Trebovaniya k sodержaniyu otcheta po obosnovaniyu bezopasnosti issledovatel'skih yadernyh ustanovok» (vmeste s «NP-049-17. Federal'nye normy i pravila...») [Federal Rules and Regulations in the Area of Atomic Energy Use «Requirements for Contents of Safety Analysis Reports for Nuclear Research Installations» (NP-049-17)], URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_286848/d118fed5f768a85d39c84b2cf9c8663f8374fb00/ (accessed 02.10.2022) (in Russian).
 - [7] Prikaz Rostekhnadzora ot 13.02.2017 № 53 «Ob utverzhdenii federal'nyh norm i pravil v oblasti ispol'zovaniya atomnoj energii «Trebovaniya k sodержaniyu otcheta po obosnovaniyu bezopasnosti bloka atomnoj stancii s reaktorom tipa VVER» (vmeste s «NP-006-16. Federal'nye normy i pravila...») [Federal Rules and Regulations in the Area of Atomic Energy Use «Requirements for the Content of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plant Units with WWER Reactors» (NP-006-16)], URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_216808/63c778acb8500b291ec33add5211eadc85068dc7/ (accessed 02.10.2022) (in Russian).
 - [8] Apros 5.06. Thermal Hydraulics Reference Guide. Thermal Hydraulic Nodes and Branches. 2007 (in English).
 - [9] Apros 6 Feature Tutorial: by VTT and Fortum. Release: Apros 6.06, 10.03.2016 (in English).
 - [10] VTT Technical Research Centre of Finland. Available from: <https://www.vttresearch.com/en> (accessed 23.09.2022) (in English).
 - [11] Oficial'nyj sajt Fortum [Fortum]. URL: <https://www.fortum.ru/> (accessed 09.09.2022) (in Russian).
 - [12] Kuryndin A.V., Stroganov A.A., Kirkin A.M., Sinegribov S.V., Burkov I.V. Uchet neopredelennosti v iskhodnyh dannyh pri provedenii raschetov teplogidravlicheskih harakteristik mokrogo hranilishcha OYAT s ispol'zovaniem programmnoy sredstva APROS 6 [Using APROS 6 Code to Assess Input Data Uncertainty in Thermalhydraulic Calculations of SNF Storage Pool. Nuclear Propulsion Reactor Plants], Tekhnologii obespecheniya zhiznennogo cikla yadernyh ustanovok [Life Cycle Management Technologies], 2019, No. 2(16), pp. 21-37 (in Russian).
 - [13] Jukka Ylijoki, Sixten Norrman, Ari Silde, Pekka Urhonen. Research Report. Validation of APROS Version 5.14.11. VTT-R-00553-15 (in English).
 - [14] ANSYS 18.1 – Obnovleniya i izmeneniya [Updates and Changes]. ANSYS, Inc., CJSC «KADFEM Si-Aj-Es», 2017, URL: https://www.cadfem-cis.ru/media/ansys_2019r1_rus.pdf (accessed 23.09.2022) (in Russian).
 - [15] Chuhlov A.G., Smirnov V.P., Afonin S.Yu. Primenenie periodicheskikh granichnyh uslovij k teplogidravlicheskomu raschetu TVS s orebrennymi tvelami [Application of Periodic Boundary Conditions to the Thermohydraulic Calculation of Fuel Assemblies with Finned Fuel Rods], Teploenergetika, 2020, No. 2, pp. 22-29, URL: https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv_nikiet2010.pdf (accessed 23.09.2022) (in Russian).
 - [16] Vunogradov M.K., Fedulin V.N. Issledovatel'skie yadernye ustanovki gosudarstv – uchastnikov Sodruzhestva Nezavisimyyh Gosudarstv [Research Nuclear Installations of the Member of the Commonwealth of Independent States]. Moscow: Gelios ARV, 2016, 480 p. (in Russian).
 - [17] Novakov I.G., Kuryndin A.V., Kirkin A.M., Makovskiy S.V. Uchet neopredelennostey v iskhodnyh dannyh pri provedenii raschetov effektivnogo koefitsienta razmnozheniya aktivnoj zony issledovatel'skoj yadernoj ustanovki [Accounting for Uncertainty in the Initial Data During the Calculations of the Effective Multiplication Factor of the Nuclear Research Reactor Core], Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Seriya: YAderno-reaktornye konstanty [Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear and Reactor Constants], 2020, No. 2, pp. 22-29 (in Russian).

- [18] Bykov V.P., Ioannisian M.V. Issledovanie vliyaniya zameny krestopodobnogo tvela na cilindricheskuyu model' v raschetah na kritichnost' po programme MCU-5 [Research of the Effect of Replacing the Cruciform Fuel Rod on The Cylindrical Model in the Calculations for Criticality under the MCU-5 Program], JSC OKB «GIDROPRESS», 2015, URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms-2015/documents/kms2015-006.pdf> (accessed 08.10.2022) (in Russian).
- [19] Petrov Yu.V., Kotova L.M. Snizhenie koncentracii urana v tvelah reaktora PIK [Reduction of the Uranium Concentration in the Fuel Rods of the PIK Reactor], Atomnaya energiya [Atomic Energy], 2002, Vol. 93, No. 2, pp. 117-120 (in Russian).
- [20] Gasparov D.L., Nikolaeva A.V., Pantyushin S.I., Lityshev A.V., Bukin N.V., Bykov M.A. Analiz chuvstvitel'nosti pri modelirovanii tyazhelykh avariij s primeneniem RK SOKRAT/V [Sensitivity Analysis in the Simulation of Severe Accidents with the Use of RC SOKRAT/V], JSC OKB «GIDROPRESS», URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2017/documents/mntk2017-161.pdf> (accessed 07.10.2022) (in Russian).
- [21] Bogdan S.N., Kovalevich O.M., Kozlova N.A., Shevchenko S.A., Yashnikov D.A. Ob ocenke pogreshnostej raschetov, vpolnyaemykh pri obosnovanii bezopasnosti ob'ektov ispol'zovaniya atomnoj energii [About the Calculation Error Evaluation in the Framework of the Nuclear Facilities Safety Analysis], Yadernaya i radiacionnaya bezopasnost' [Nuclear and Radiation Safety], 2017, No. 2(84), 16 p. (in Russian).

The Problem of Modeling the Geometry of Twisted Fuel Rods with X-Type Cross Section in the Performance of Thermohydraulic Calculations

© **Andrey M. Kirkin¹, Anton V. Kuryndin², Sergey V. Sinegribov³, Arsenii O. Smirnov⁴, Valerii M. Khlobystov⁵**

Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Malaya Krasnoselskaya st. 2/8, bld. 5, Moscow, Russia, 107140

¹*kirkin@secnrs.ru*

²*kuryndin@secnrs.ru*

³*sinegribov@secnrs.ru*

⁴*asmirnov@secnrs.ru, ORCID iD: 0000-0003-2877-051X, WoS ResearcherID: HGF-2838-2022*

⁵*hlobystov@secnrs.ru, ORCID iD: 0000-0001-5491-2126, WoS ResearcherID: AAF-7721-2021*

Received by the editorial office on 12/08/2022

After revision on 02/09/2023

Accepted for publication 02/21/2023

Abstract. For creating computational models of processes affecting the safety of nuclear facilities, in accordance with the federal rules and regulations in the field of atomic energy use, the selected modeling methods, as well as the accepted approximations and assumptions shall be justified. The paper considers the issues of taking into account the specifics of modeling the geometry of twisted fuel rods with x-type cross section using nodalization software, as well as possible approaches to describing the geometry of such fuel rods during thermohydraulic calculations. The paper defines a preferred method for specifying geometry, which allows to correctly take into account the maximum value of the heat flux from the surface of the twisted fuel rods with x-type cross section when calculating temperatures in the core and the possibility of a heat exchange crisis on the surface of such fuel rods in case of violations of normal operation.

Keywords: safety of nuclear reactors, approximations and assumptions, thermohydraulic calculation, twisted fuel rods with x-type cross section, processes important for safety, nodal construction of the computational domain.

For citation: Kirkin A.M., Kuryndin A.V., Sinegribov S.V., Smirnov A.O., Khlobystov V.M. The Problem of Modeling the Geometry of Twisted Fuel Rods With X-Type Cross Section in the Performance of Thermohydraulic Calculations // Global Nuclear Safety. 2023. No. 1(46). P. 23-35 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2023-01-03>.

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

DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 620.179.1: 621.039
DOI 10.26583/gns-2023-01-04
EDN MTISAX

**ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА
СКАНИРУЮЩЕЙ КОНТАКТНОЙ ПОТЕНЦИОМЕТРИИ
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС ПРИ ЕГО
ИЗГОТОВЛЕНИИ**

© 2023 Виталий Иванович Сурин¹, Александр Сергеевич Щербань²,
Александр Антонович Щербаков³, Максим Евгеньевич Жидков⁴,
Сергей Алексеевич Томилин⁵, Михаил Борисович Иваний⁶

^{1,3,6}Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия
^{2,4}Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», Волгодонск, Жуковское ш., 10, Ростовская обл., Россия
⁵Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

¹VISurin@mephi.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6153-0206>

²shcherban_as@atommash.ru

³AASherbakov@mephi.ru

⁴zhidkov_me@atommash.ru

⁵SATomilin@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8661-8386>

⁶MBIvanii@mephi.ru

Аннотация. В заводских условиях проведены исследования метода сканирующей контактной потенциометрии (СКП) и продемонстрированы функциональные возможности выявления структурных неоднородностей и технологических дефектов электрическим методом неразрушающего контроля (НК) непосредственно в процессе производства реакторного оборудования.

Ключевые слова: электрический неразрушающий контроль, метод сканирующей контактной потенциометрии, техническая диагностика и неразрушающий контроль реакторного оборудования.

Для цитирования: Сурин В.И., Щербань А.С., Щербаков А.А., Жидков М.Е., Томилин С.А., Иваний М.Б. Обоснование применимости метода сканирующей контактной потенциометрии для контроля оборудования АЭС при его изготовлении // Глобальная ядерная безопасность. – 2023. – № 1(46). – С. 36-53 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2023-01-04>.

Поступила в редакцию 30.11.2022

После доработки 08.02.2023

Принята к публикации 21.02.2023

Введение

В современных условиях к качеству оборудования для российских и зарубежных АЭС предъявляются особые требования к надежности, которые определяют постоянную необходимость совершенствования системы управления качеством продукции на машиностроительных предприятиях ГК «Росатом».

Метод сканирующей контактной потенциометрии (СКП) на сегодняшний день изучен в полной мере и зарекомендовал себя как современный высокотехнологичный научный инструмент, обладающий уникальными особенностями. Применение метода СКП позволило решить ряд важных научных и практических задач [1-3]. Сегодня

данный метод выходит на стадию практического внедрения в промышленное производство и проходит заключительный этап экспериментальной и методической проверки на предприятиях атомной отрасли. Метод СКП имеет очевидные преимущества перед электрическими методами неразрушающего контроля (НК), используемыми в настоящее время для исследования и контроля сварных соединений [4-6].

В нашей стране нормативная и методическая документация не предусматривает проведение контроля методом СКП изделий, входящих в контур оборудования АЭС, однако, в документах МАГАТЭ нормами безопасности IAEA Safety Standards Series № Ns-G-2/6 предусмотрен электроконтактный метод неразрушающего контроля. На текущий момент существует устойчивая тенденция к гармонизации отечественной и международной нормативной документации в области атомной энергетики, в том числе и к требованиям МАГАТЭ, на основании которой метод СКП может стать обязательным к применению при производстве и эксплуатации оборудования АЭС наравне с другими объемными методами неразрушающего контроля – ультразвуковой дефектоскопией и радиографией [7-12]. Поэтому в настоящее время уже проводится подготовительная работа по разработке Государственного стандарта для применения метода СКП в атомной энергетике.

Полученные результаты предыдущих этапов работы подтверждают высокую эффективность разработанного метода НК: получаемые данные адекватно и с необходимой точностью отражают информацию о наличии дефектов, протекании физических процессов, состоянии материала, кинетики разрушения и в ряде других практических важных случаев.

В представленной статье приводятся некоторые результаты заключительного этапа исследования метода СКП в Филиале АО «АЭМ-технологии «Атоммаш» в г. Волгодонске.

Условия и методика проведения исследований

Две основные цели были поставлены перед проведением исследований:

1. Продемонстрировать функциональные возможности эффективного выявления структурных неоднородностей и технологических дефектов методом СКП непосредственно в процессе производства реакторного оборудования.

2. Обобщить полученные результаты с имеющимися данными, чтобы подготовить рекомендации для практического внедрения метода СКП в атомную отрасль, а также для разработки нормативной документации государственного назначения.

Для этого необходимо было решить следующие задачи:

- разработать методику (технологическую карту контроля) ручного электрического НК для проведения измерений в условиях Филиала АО «АЭМ-технологии «Атоммаш» г. Волгодонск на промышленных изделиях и оборудовании широкого ассортимента;
- использовать результаты УЗК и РГК отдела методов неразрушающего контроля завода для идентификации обнаруженных несплошностей и других дефектов;
- обработать результаты контроля и идентифицировать обнаруженные дефекты;
- подготовить заключение.

Измерения выполнялись на подготовленных образцах оборудования следующих наименований:

- парогенератор ПГВ-1000М, №10, сварные соединения №111 для обоих коллекторов;
- коллектор пара, чертеж детали АМ110.05.04.000, №10. Сварные швы №3-6, №3-7, №3-9 и №3-10;
- клапан обратный АИЦН1218.1400.160302;
- труба с наплавкой «И», №5, АМ 117.03.02.540.

Методика измерений была адаптирована под заводские условия, а также использовался ранее полученный нами опыт [3].

Непосредственно перед проведением электрического НК производится визуальный контроль поверхности. Для ручного сканирования применяли датчики ручного контроля, специальные измерительные ячейки и трафареты. Измерительный прибор, в данном случае мультиметр Keysight, и программно-аппаратный комплекс мобильной диагностической системы «Elphyslab – АМ», размещенной на ноутбуке Huawei, устанавливались на столе вблизи объекта контроля. Поверхность электрофизического преобразователя и поверхность контроля протирались спиртовым раствором.

Шаг сканирования вдоль трека составлял от 1 до 10 мм. Частота дискретизации измерений была равной 1 Гц. В зависимости от размеров объектов контроля число треков сканирования изменялось в пределах от 5 до 20. Расстояние между треками составляло от 1 до 5 мм.

Результаты исследований

1. Парогенератор ПГВ-1000М №10_АМ 110.05.04.000

Характеристики объекта контроля

Контролируемым оборудованием являлся коллектор пара. Контролируемым элементом являлись сварные соединения №111-1.

Построены потенциограммы для коллектора №1 (рис. 1) и коллектора №2 парогенератора ПГВ-1000 М, наименование АМ 110.05.02.110 и АМ 110.05.02.111. Анализ потенциограмм проводился на различных уровнях фиксации, как правило, начиная с низких уровней и заканчивая высокими.

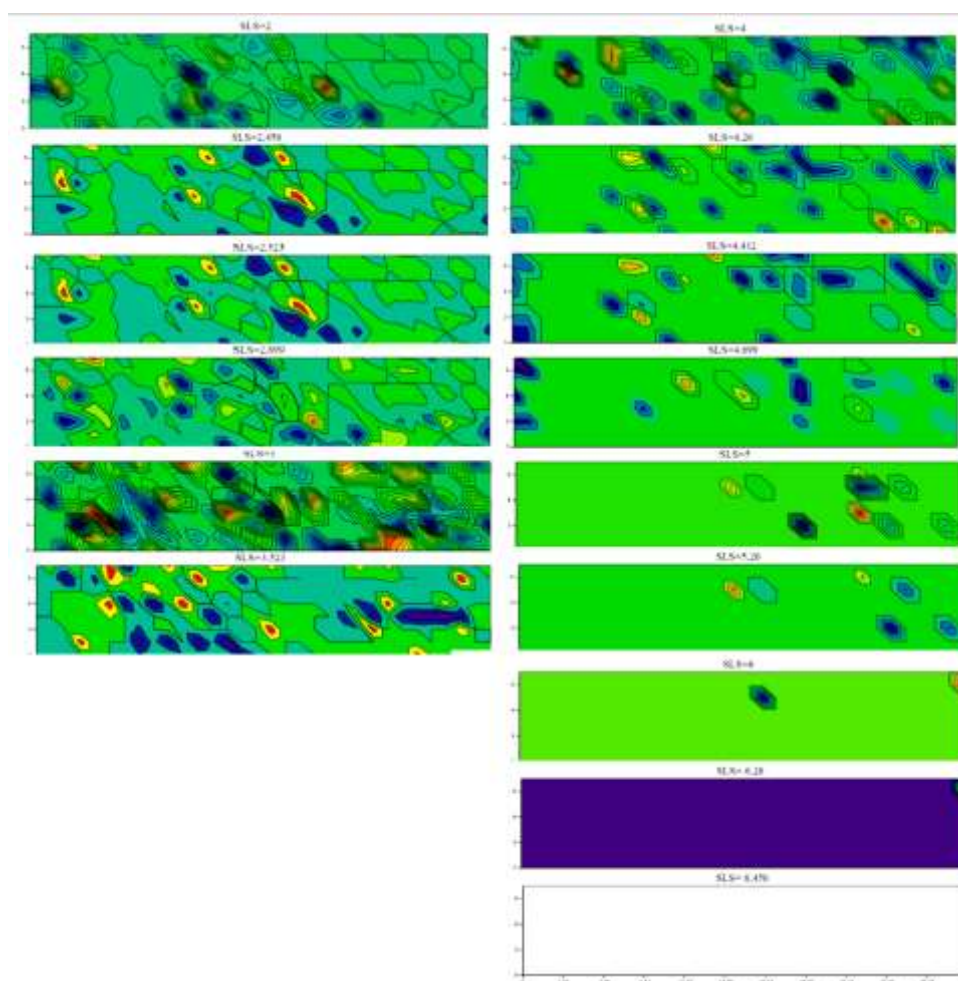


Рисунок 1 – Потенциограммы для участка №1 первого коллектора. Для каждой потенциограммы указан уровень фиксации SLS [Potentiograms for section 1 of the first manifold. SLS fixation level is indicated for each potentiogram]

Результаты сканирующей контактной потенциометрии были проанализированы и сопоставлены с результатами радиографического контроля.

Распределение цветовых рефлексов на потенциограммах соответствует состоянию застывшего после расплавления металла. На большинстве участков обоих коллекторов наблюдается равномерное распределение образовавшихся концентраторов напряжений. Преимущественная окраска зеленых и светло зеленых цветов на потенциограммах характеризует однородность структуры сварного соединения по глубине. На некоторых участках наблюдается неоднородность фазового состава или наличие обширных выделений.

Для коллектора №1, участков с номерами 3-8 и 12-18 на уровнях фиксации SLS=4 – 4,432 наблюдаются рефлексы в виде протяженных широких полос синих и голубых цветов. Подобные рефлексы, как правило, связаны с особенностями технологии сварочных работ.

Для коллектора №2, участков с номерами 4-7 и 15-17 наблюдаются похожие рефлексы красно-желтых тонов.

Сравнение результатов СКП и результатов РГК показывает следующее.

На участке №14 второго коллектора наблюдается дефект сложной конфигурации, классифицируемый как частичное несплавление металлов по линии контакта. Рефлекс представляет собой фрагментированные участки, ограниченные отрезками прямых, которые располагаются на различной глубине относительно поверхности сварного соединения. Наибольшая выпуклость дефекта находится на уровне SLS=2. Некоторые фрагменты фиксируются на уровне SLS=4,432. Вероятная причина возникновения дефекта связана с отсутствием необходимой плоскопараллельности двух соприкасающихся поверхностей в этом месте (рис. 2).

Фиксация таких дефектов как отдельные поры, скопления пор, шлаковые скопления и другие, затруднены действием фона от мощных концентраторов напряжений и эффектами взаимного экранирования дефектов.

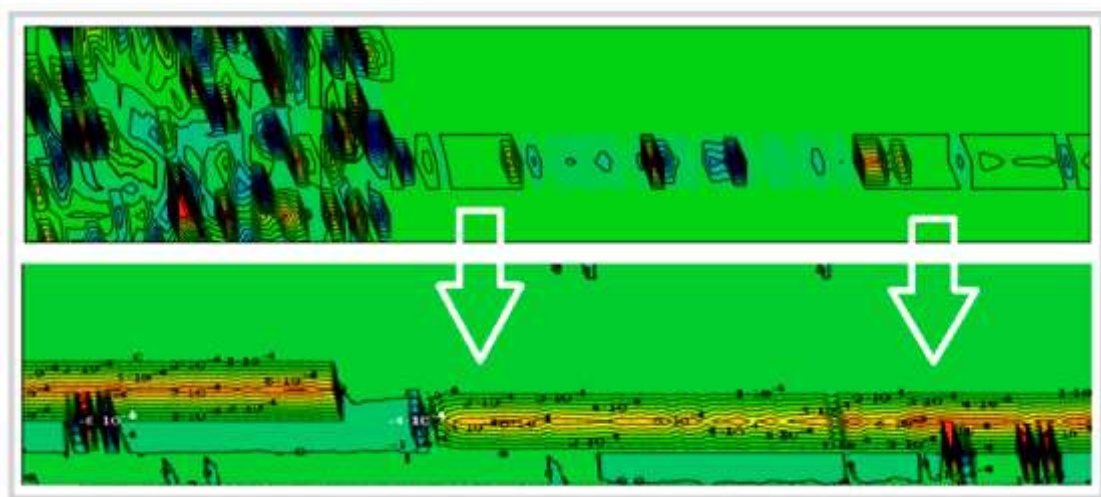


Рисунок 2 – Сравнение результата электрического НК участка №14 коллектора №2 (верхний рисунок) и результат контроля, взятого из архива данных лаборатории ФЭДНК (нижний рисунок) [Comparison of electrical NDT result of collector No.2 section No.14 (top figure) and control result taken from the FEDNC laboratory data archive (bottom figure)]

2. Коллектор пара АМ 110.05.04.000

Характеристики объекта контроля

Контролируемым оборудованием являлся коллектор пара. Контролируемым элементом являлись сварные соединения №№3-6, 3-7, 3-9 и 3-10 (рис. 3), чертеж детали АМ 110.05.04.000 СБ. Контролируемый элемент представляет собой угловое кольцевое сварное соединение. Основной металл 16ГС + Сталь 20. Сварочный материал выполнен

из сплава Св-08ГС2С. Нормативная документация, по которой выполнен радиографический контроль – ПНАЭГ-010-89, методическая документация – ПНАЭГ-7-017-89. Категория сварного соединения имеет литеру I. Тип контролируемого элемента относится к угловому сварному соединению заварки патрубка. Размеры контролируемого элемента приводятся в таблице 1. Размеры зоны электрического контроля 7,5х5,5 см. Поверхность контроля коническая.

Схема просвечивания соответствует ПНАЭ Г-7-017-89. Полная информация приводится в сборнике технологических карт. Измерение размеров выявленных несплошностей производится с помощью линейки (первичная оценка) и измерительной лупы (совокупности включений и при размерах одиночных включений по первичной оценке близких к допускаемому размеру, соответственно 3,5 и 2,5 мм) по наибольшему размеру индикаций несплошностей.

Технологическая карта электрического контроля составлена с учетом требований РГК и представлена в таблице 2.

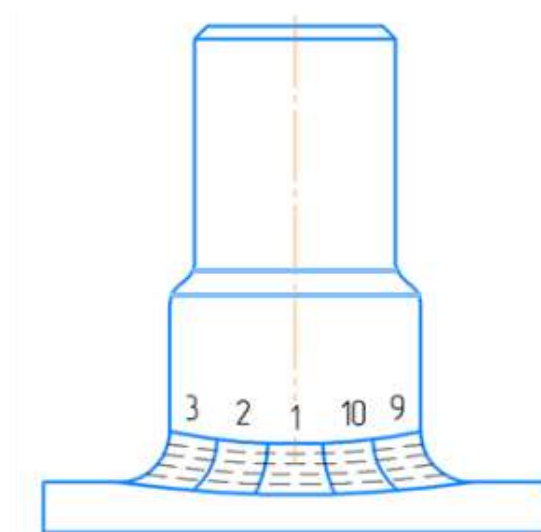


Рисунок 3 – Контролируемый элемент коллектора пара: 1-10 – участки сварного шва
[Controlled element of the steam collector: 1-10 – sections of the weld]

Таблица 1 – Размеры контролируемого элемента [Dimensions of the controlled element]

Размеры, мм	
Для изделия диаметр наружный, D	630
Для патрубка диаметр наружный, d	237
Толщина стенки, S1	25
Угол между осью патрубка и нормалью к поверхности изделия γ , град	0
Катеты шва по изделию, e	9±2
Катеты шва по патрубку, g	44 ⁺² ₋₃
Угол разделки кромки кромки патрубка β , град	40
Усиление шва по поверхности	снято
Ширина околошовной зоны, z	3
Для изделия диаметр наружный, D	630
Для патрубка диаметр наружный, d	237
Толщина стенки, S1	25
Угол между осью патрубка и нормалью к поверхности изделия γ , град	0
Катеты шва по изделию, e	9±2
Катеты шва по патрубку, g	44 ⁺² ₋₃
Угол разделки кромки кромки патрубка β , град	40
Усиление шва по поверхности	снято
Ширина околошовной зоны, z	3

Таблица 2 – Технологическая карта электрического контроля [Dimensions of the controlled element]

Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонске				
ОМТК	Технологическая карта электрического контроля			Лист 1 Листов 5
1. Объект контроля – Коллектор пара				
1.1. Предприятие-изготовитель		Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г Волгодонске		
1.2. Контролируемое оборудование		Коллектор пара		
1.3. № чертежа				
1.4. Контролируемый элемент		Сварные соединения №№ 3-6, 3-7, 3-9 и 3-10		
1.5. Чертеж детали		Рисунок		
1.6. Тип сварного соединения		Угловое кольцевое сварное соединение		
1.7. Обозначение				
1.8. Способ сварки		10		
1.9. Основной металл		16ГС + Сталь 20		
1.10 Сварочный материал		Св-08Г2С		
1.11 Контроль		дополнительный		
2. Документация, по которой производится контроль				
2.1. Нормативная			2.2. Методическая	
3. Требования к технологии контроля и оценке качества				
3.1. Категория сварного соединения		I	3.2. Объем контроля, %	
			100	
4. Тип и размеры контролируемого элемента				
4.1. Тип контролируемого элемента		Угловое сварное соединение вварки патрубка		
4.2. Размеры, мм				
4.2.1. Для изделия: диаметр наружный, D		630	Толщина стенки, S1	25
4.2.2. Для патрубка: диаметр наружный, d		237	Толщина стенки, S	25
4.2.3. Угол между осью патрубка и нормалью к поверхности изделия γ, град		0		
4.2.4. Катеты шва по изделию, e		9±2	патрубку, g	44 ⁺² ₋₃
4.2.5. Угол разделки кромки патрубка β, град		40		
4.2.6. Усиление шва по внутренней поверхности		снято		
4.2.7. Ширина околошовной зоны, z		3		
Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонске				
ОМНК	Технологическая карта электрического контроля			Лист 2 Листов 5
5. Средства контроля				
Измерительный прибор		Мультиметр Keysight 34465A 6 ^{1/2} Digit multimeter, зав. № МУ 59007727		
Способ контроля		Ручной, точечный		
Измеряемая величина		Контактная разность потенциалов		
Материал преобразователя		12Х18Н10Т		
Диаметр наконечника датчика, мм		2,5		
Предел измерений, В		0,01		
Накладка трафаретная		Сетка пластиковая штукатурная с размером ячейки 3х3 мм		
Расположение второго электрического контакта		На поверхности изделия		
Сила прижатия преобразователя к поверхности контроля, Н, не более		0,5		
Угол наклона оси датчика к поверхности контроля, град		80-90		
Шаг сканирования, мм		3		
Условная плотность точек контроля		14х22		
Шероховатость поверхности, мкм, не хуже		Rz 40		
6. Схема и параметры контроля				
6.1. Схема электрического контроля – методическая				
		Установить на контролируемом участке трафарет и закрепить его на поверхности клеющимися прижимами. С каждой стороны трафарет должен выходить за пределы контролируемого участка на 5-7 мм. По трафарету определить число точек контроля в двух взаимно перпендикулярных направлениях (x и y).		

Продолжение таблицы 2

		Ручное поточечное сканирование проводится вдоль горизонтальных измерительных дорожек «слева направо» в направлении «снизу вверх» поочередно в каждой клетке трафарета.
6.2. Число контролируемых участков		10
7. Подготовка контролируемого элемента		
7.1. Требования к качеству поверхности	Подлежащее контролю сварное соединение должно быть очищено от окалины, шлака, брызг металла и других загрязнений, и обезжирено растворителем. Также должны быть устранены все обнаруженные при внешнем осмотре наружные дефекты, а также неровности, рефлекс от которых на потенциограмме могут помешать выявлению и расшифровке изображений внутренних несплошностей сварного соединения.	
Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонске		
ОНМК	Технологическая карта электрического контроля	Лист 3 Листов 5
7.2. Разметка на участки	Контролируемое сварное соединение должно быть размечено на 10 участков и выделена контролируемая зона	
8. Условия и порядок проведения контроля		
8.1. Место проведения контроля	На территории завода	
8.2. Состав рабочего звена	Два дефектоскописта, один из которых должен иметь квалификацию с правом выдачи заключения	
8.3. Диапазон рабочих температур	+10 ÷ +30	
8.4. Последовательность технологических операций:		
8.4.1. Согласно п. 6.1. закрепить на контролируемой поверхности трафарет. Маркировка участка контроля должна содержать следующую информацию: - номер заключения; - заводской номер изделия; - маркировку контролируемого элемента; - номер участка; - шифр дефектоскописта.		
8.4.2. Включить информационно-измерительную систему на прогрев в течение 30 минут		
8.4.3. Произвести необходимые действия на компьютере для сохранения измерительной информации		
8.4.4. Произвести ручное сканирование поверхности контроля		
8.4.5. По окончании сканирования снять трафарет и укрепить его на следующем участке контроля		
8.4.6. Повторить операции по пп. 8.4.3. и 8.4.4.		
8.4.7. Выполнить обработку результатов контроля в соответствии с методическими указаниями		
9. Расшифровка потенциограмм		
9.1. С помощью программы обработки результатов построить и расшифровать потенциограммы		
9.2. Расшифровка потенциограмм производится на разных структурных уровнях сигнала SLS: от значения 2 до значения 6 в соответствии с методическими указаниями		
9.3. Потенциограммы, построенные для каждого структурного уровня, собираются в один общий рисунок		
9.4. Зона расшифровки ограничивается размером трафарета и условной плотностью точек контроля		
9.5. На потенциограммах произвести отбор выявленных несплошностей, полученных другими методами неразрушающего контроля		
Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонске		
ОНМК	Технологическая карта электрического контроля	Лист 4 Листов 5
9.6. Измерение размеров выявленных несплошностей производить с помощью компьютерной программы обработки результатов		
9.7. Измеренные при расшифровке потенциограмм размеры следует округлить до ближайших значений рекомендуемого ряда		

Продолжение таблицы 2

10. Оценка качества					
10.1. Качество сварного соединения считается удовлетворительным, если на потенциограммах не будут зафиксированы трещины и непровары, а также включения недопустимых размеров					
10.2. Нормы допустимых одиночных включений и скоплений следует принимать для расчетной высоты углового шва (согласно АМ 110.05.04.000 ТБ2) – 26 мм:					
Одиночные включения и скопления*				Одиночные крупные включения	
Допускаемый наибольший размер		Допускаемое число включений и скоплений на любом участке сварного соединения длиной 100 мм	Допускаемая суммарная приведенная площадь включений и скоплений на любом участке сварного соединения, длиной 100 мм, мм ²	Допускаемые	
включения, мм	скопления, мм				
2,5	3,5	15	20,0	5,0	2,5
2					
*- при определении скопления учитываются любые включения, наибольший размер которых превышает 0,2 мм					
10.3. Выявленные включения, наибольший размер которых менее 0,4 мм при оценке качества сварных соединений не учитываются как при подсчете количества включений и их суммарной приведенной площади, так и при рассмотрении расстояний между включениями (скоплениями).					
10.4. Любую совокупность включений (одиночных скоплений, групп включений), которая может быть вписана в прямоугольник с размерами сторон, не превышающим 5,0×2,5 мм или квадрат с размером стороны, не превышающим 2,5 мм, допускается рассматривать как одно сплошное включение.					
10.5. При отсутствии одиночных крупных включений (в том числе принимаемых за указанные включения по п. 10.4) или при их количестве, менее допускаемого по нормам таблицы 10.2., вместо них могут быть допущены в соответствующем количестве одиночные включения и/или одиночные скопления допускаемых размеров без их учета при подсчете суммарной площади одиночных включений и одиночных скоплений.					
Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонске					
ОНМК		Технологическая карта электрического контроля			Лист 5 Листов 5
10.6. Результаты оценки допустимости по пп. 10.1-10.5 и выводы о качестве контролируемого элемента занести в рабочий журнал и заключение. При обнаружении несплошностей, подлежащих исправлению, сообщить изготовителю.					

Все дефекты, обнаруженные на пленках РГК, идентифицированы и сопоставлены с результатами электрического контроля, представленными на потенциограммах.

Для сварного соединения №3-6 в центральной части второго участка на уровне фиксации SLS=4,26 присутствует шестиугольный рефлекс, идентифицируемый как одиночная пора. Центральная часть рефлекса (на потенциограмме красная точка), соответствующая наибольшему значению амплитуды сигнала контроля, имеет диаметр 2-3 мм (рис. 4).

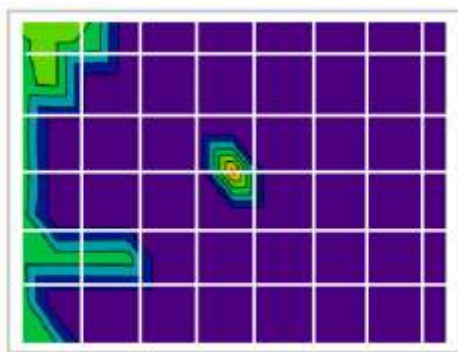


Рисунок 4 – Рефлекс от одиночной поры в центре участка контроля. Размер сетки 1x1 см. Участок №2 [Reflex from a single pore in the center of the control area. The size of the grid is 1x1 cm. Site No.2]

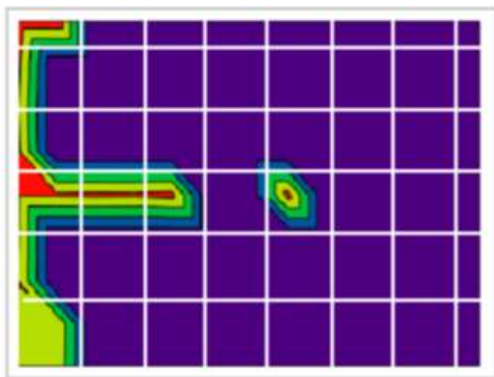


Рисунок 5 – Непровар с левой стороны рисунка. Длина дефекта 15-20 мм. Участок №3. Сравнение результата на потенциограмме (слева) и фрагмент непровара на рентгеновской пленке (справа) [Failure on the left side of the pattern. The length of the defect is 15-20 mm. Site No.3. Comparison of the result on the potentiogram (left) and a fragment of the failure on the X-ray film (right)]

На третьем участке, вдоль линии сопряжения двух свариваемых поверхностей, идентифицирован протяженный дефект «непровар». Длина дефекта 15-20 мм, ширина – 1 мм (рис. 5).

На четвертом участке, в нижней части, идентифицирован протяженный дефект «непровар». Длина дефекта 15 мм, ширина – 1 мм (рис. 6).

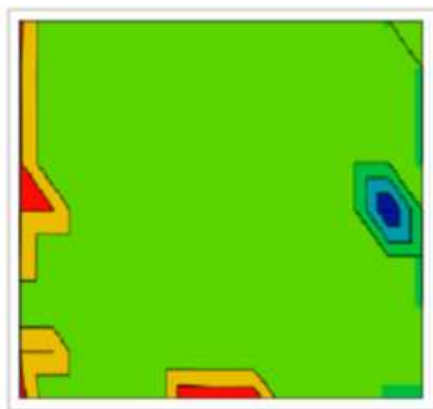


Рисунок 6 – Непровар на уровне фиксации SLS=4. Длина дефекта 10-15 мм. Участок №4 [Failure at the fixation level SLS=4. Length of the defect is 10-15 mm. Site No.4]

На седьмом участке идентифицирована пора диаметром 2 мм.

На восьмом участке идентифицирован непровар, в нижней части участка контроля (рис. 7, SLS=4).

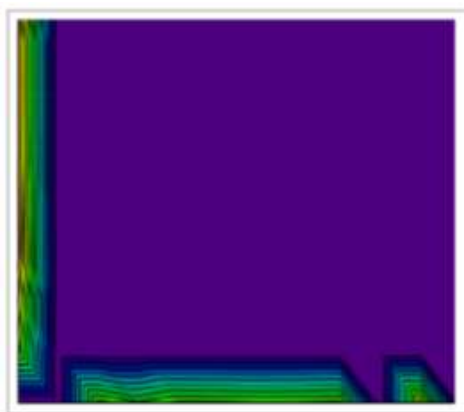


Рисунок 7 – Непровар. Участок №8 [Failure to brew. Site No.8]

На девятом и десятом участках идентифицированы поры.

На участке №5, начиная с $SLS=4,26$, в нижней части потенциограммы видна темная продольная полоса, длиной 50 мм и шириной менее 1 мм.

Для сварного соединения №3-7 в верхней части первого участка на уровне фиксации $SLS=3$ идентифицировано шлаковое скопление $C5Ш3x1$ (рис. 8).

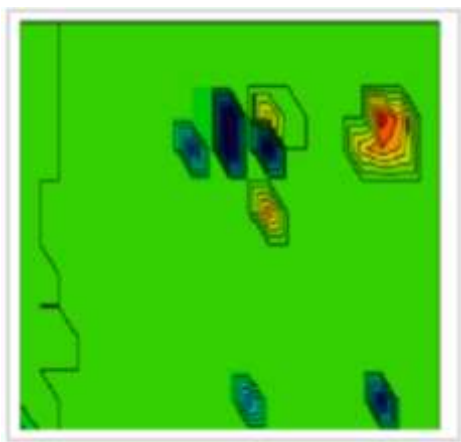


Рисунок 8 – Шлаковое скопление $C5Ш3x1$. Участок №1 [Slag cluster $C5Sh3x1$. Site No.1]

Шлаковые скопления и поры идентифицированы также и на других участках этого сварного соединения:

- участок №2 $C5Ш1,5x0,5$ (рис. 9);
- участок №3 $C5Ш1,5x0,5$;
- участок №4 $Ш2x0,8$;
- участок №5 $П0,5$;
- участок №6 $П0,3$;
- участок №10 $C5Ш2x1,5$.

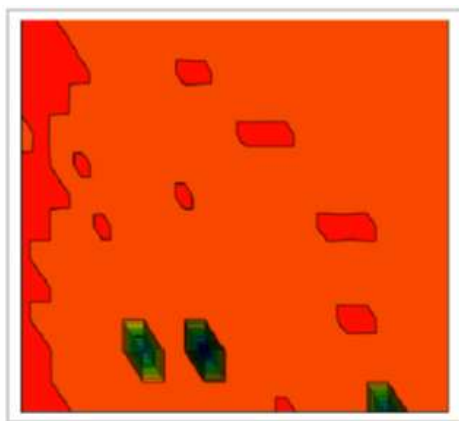


Рисунок 9 – Шлаковое скопление $C5Ш1,5x0,5$. Участок №2 [Slag accumulation $C5Sh1,5x0,5$. Site No.2]

Для сварного соединения №3-9 идентифицированы следующие шлаковые скопления и скопления пор:

- участок №1 $C5Ш1,5x1$;
- участок №2 $C10Ш1,5x1,2$;
- участок №3 $П1,2$; $П0,8$; $C5П1,0$; $C7П1,0$; $П1,5$ (рис. 10);
- участок №4 $C7П0,6$; $Ш1,2x1$; $П0,6$;
- участок №5 $2П1,2$; $П1,0$;
- участок №6 $C10П1,5$; $П1,2$;
- участок №9 $C12Ш2,5x1,2$.

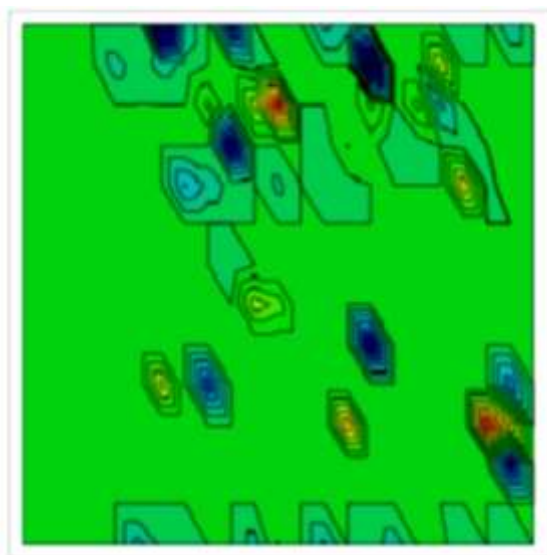


Рисунок 10 – Поры и скопления пор П1,2; П0,8; С5П1,0; С7П1,0; П1, Участок №3 [Pores and pore clusters P1.2; P0.8; C5P1.0; C7P1.0; P1, Site No. 3]

Комплексное протяженное скопление С15Ш5х1,2; П2; П1,5; П0,6; С10П1,2; С7Ш3х2 идентифицировано на участке №8 и уровне фиксации SLS=3 (рис. 11).

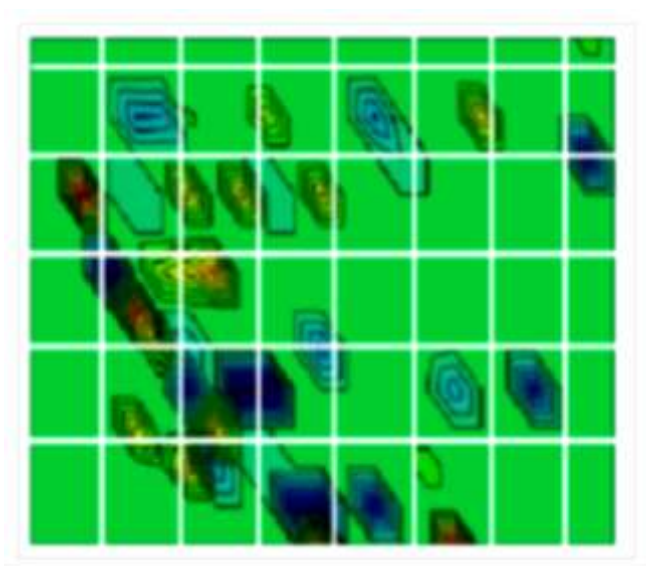


Рисунок 11 – Комплексное протяженное скопление С15Ш5х1,2; П2; П1,5; П0,6; С10П1,2; С7Ш3х2 на участке №8. Уровень фиксации SLS=3 [Complex extended cluster C15Sh5x1.2; P2; P1.5; P0.6; C10P1.2; C7Sh3x2 at site No.8. Fixation level SLS=3]

Для сварного соединения №3-10 идентифицированы шлаковое скопление и отдельные поры на следующих участках:

- участок №1 П;
- участок №2 П;
- участок №3 П;
- участок №4 С12Ш3х1,5 (рис. 12);
- участок №6 П;
- участок №7 П;
- участок №10 П.

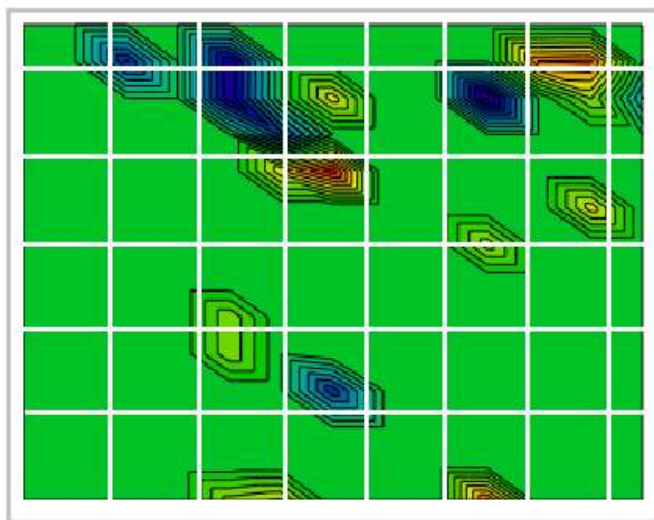


Рисунок 12 – Протяженное шлаковое скопление С12Ш3х1,5 на участке №4. Уровень фиксации SLS=3[Extended slag accumulation C12Sh3x1.5 in section No.4. Fixation level SLS=3]

3. Клапан обратный АИЦН1218.1400.160302

Характеристики объекта контроля

Контролируемым оборудованием являлся клапан обратный. Контролируемыми элементами являлись два выбранных участка на внешней поверхности клапана, которые представляют собой цилиндрические поверхности. Размер зоны контроля составляет 111,5х34,5 см. Объект контроля изготовлен литьем. Толщина стенки контроля 14,5 см. На поверхности видны многочисленные пятна коррозии размерами 1-5 мм.

Результаты электрического контроля представлены на потенциограммах (рис. 13 и 14).

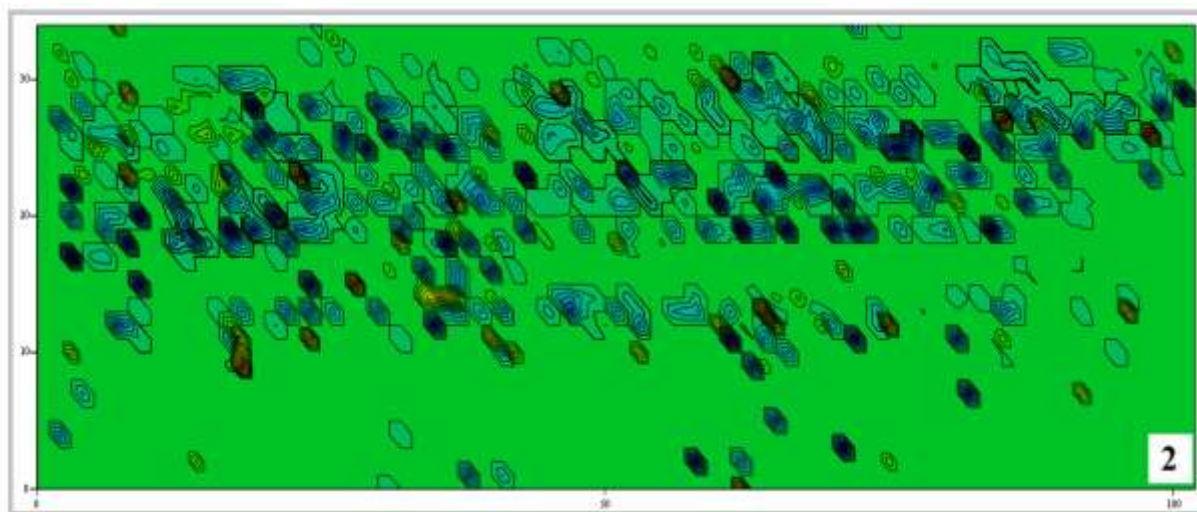


Рисунок 13 – Клапан обратный. Участок №1. Уровень фиксации SLS=2[Check valve. Site No. 1. Locking level SLS=2]

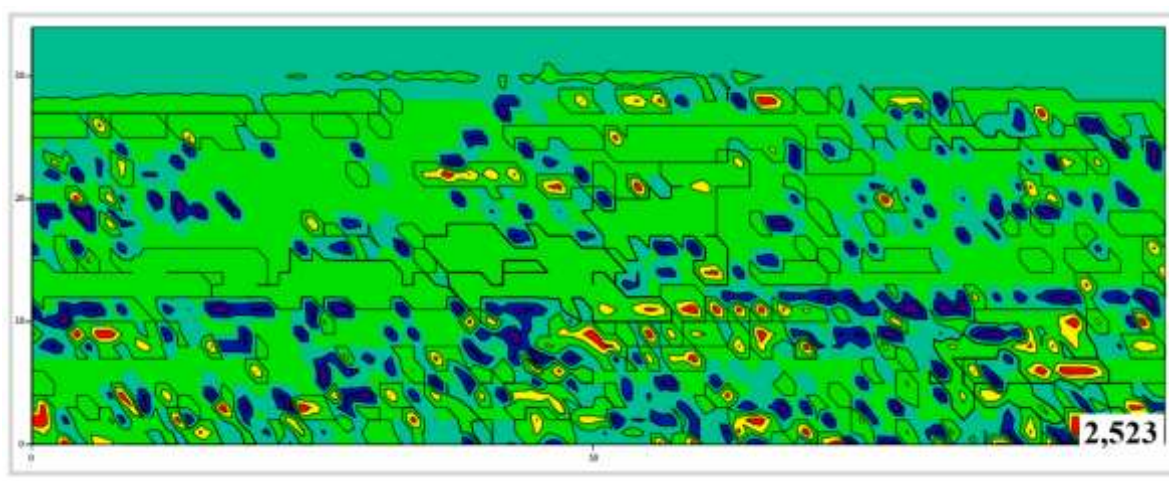


Рисунок 14 – Клапан обратный. Участок №2. Уровень фиксации SLS=2,523[Check valve. Site No.2. Fixation level SLS=2.523]

Для первого участка на уровнях фиксации SLS=2-3 видны многочисленные подповерхностные дефекты. Дефекты имеют форму простых геометрических фигур (треугольников, многоугольников), их разнообразные сочетания, а также фигуры неправильной формы. На низких уровнях фиксации видны также контуры протяженных рефлексов, ограниченных замкнутыми тонкими линиями. Указанные рефлексy имеют вид отдельных полосовых фигур и хорошо видны на уровнях фиксации SLS=4 и 4,26. На уровне фиксации SLS=4,699 обнаружен протяженный рефлекс, имеющий отношение к внутренней протяженной полости или образованной каверне.

Аналогичные виды рефлексов наблюдаются и на втором участке контроля. Рефлексy в виде ограниченных полосовых структур здесь также имеют место на уровнях фиксации SLS=4 и 4,26, что может быть причиной имеющегося значительного протяженного дефекта в целом слое металла.

4. Труба с наплавкой И, №5, АМ 117.03.02.540

Характеристики объекта контроля

Контролируемым оборудованием являлась труба с наплавкой И №5 (рис. 15). Особенностью контроля трубы с наплавкой И было применение двойного поверхностного сканирования участков №10 и №11. Контролируемый элемент представляет собой цилиндрическую поверхность со скошенным торцом. Толщина наплавки 25 мм, высота 22 мм. Условная плотность точек электрического контроля для цилиндрической поверхности 10x26, для торцевой поверхности – 16x30.

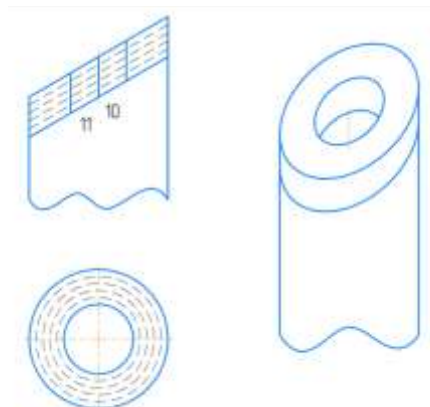


Рисунок 15 – Эскиз трубы с наплавкой И АМ 117.03.02.540 [Sketch of a tube with cladding AND AM 117.03.02.540]

Результаты электрического контроля трубы с наплавкой для участка №11 представлены на потенциограммах (рис. 16 и 17).

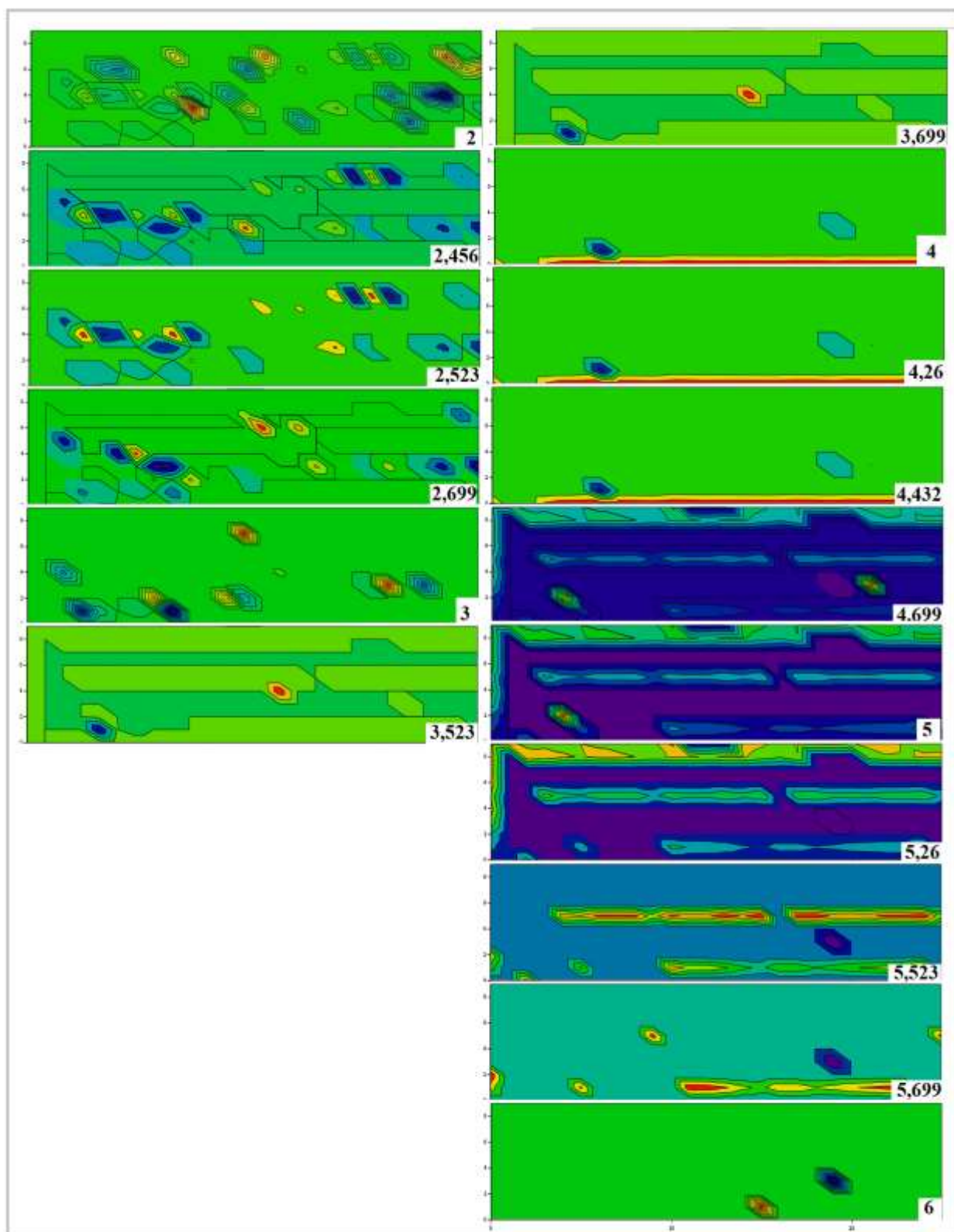


Рисунок 16 – Потенциограммы для участка №11 трубы с наплавкой (сканирование по цилиндрической поверхности). Для каждой потенциограммы указан уровень фиксации [Potentiograms for section No.11 of the cladding pipe (cylindrical surface scan). The level of fixation is indicated for each potentiogram]

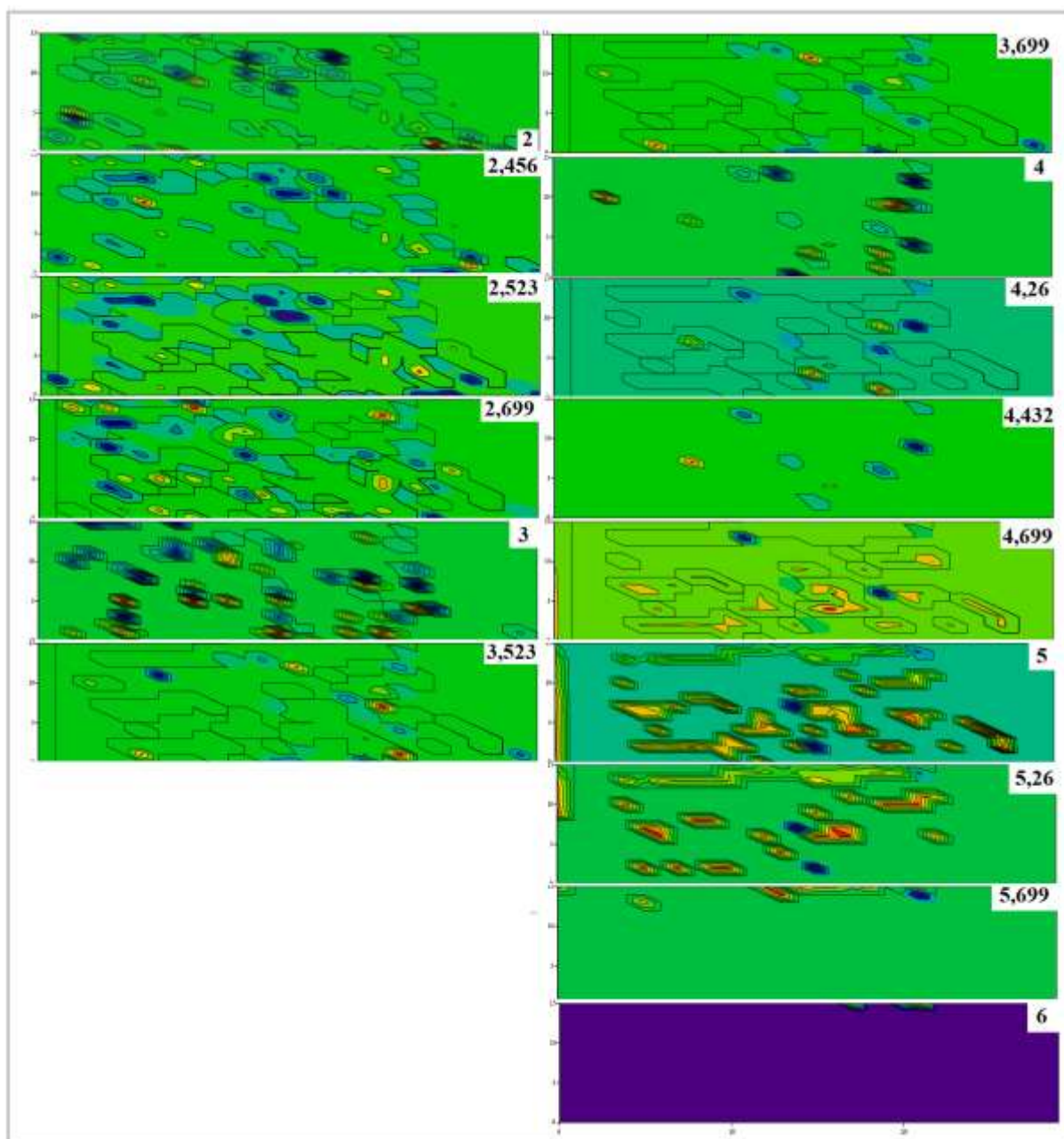


Рисунок 17 – Потенциограммы для участка №11 трубы с наплавкой (сканирование с торца). Для каждой потенциограммы указан уровень фиксации [Potentiograms for the cladding section No.11 of the pipe (scanning from the end). The level of fixation is indicated for each potentiogram]

При контроле по цилиндрической поверхности контуры дефектов с малой мощностью хорошо видны на уровне фиксации $SLS=3,523$. Точные координаты этих дефектов можно определить на высоком уровне фиксации $SLS=5,699$.

На участке №11 в нижней части наплавки на уровне фиксации $SLS=4$ видна тонкая полоса непровара. Структура дефекта, его отдельные части, хорошо видны на уровне фиксации $SLS=5,523$ и $5,699$, а также на потенциограмме при торцевом контроле.

Следует отметить одно существенное преимущество представления результатов метода СКП по сравнению с представлением результатов методом РГК. Результаты на рентгеновской пленке отображаются в плоскости, а на потенциограмме можно получить распределение дефектов в объеме изделия (рис. 18). Возможен двойной или

двусторонний РГК объекта контроля, но это гораздо сложнее реализовать практически, чем двойное сканирование поверхностей методом СКП.

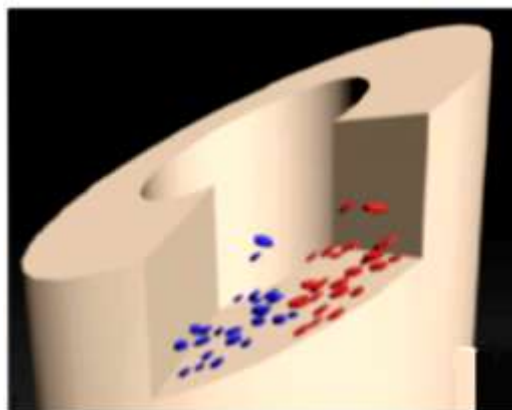


Рисунок 18 – Распределения дефектов в объеме наплавки на участках №10 и №11 выделены различными цветами [Distributions of defects in the cladding volume at sections 10 and 11 are highlighted in different colors]

Применение же двух независимых методов контроля СКП и РГК дает возможность с высокой точностью и надежностью определить координаты и глубину залегания дефектов, для этого необходима точная привязка по координатам для двух указанных методов НК.

Заключение

1. Проведено совместное научное исследование метода сканирующей контактной потенциометрии представителями НИЯУ МИФИ и сотрудниками ОНМК Филиала АО «АЭМ-технологии «Атоммаш» г. Волгодонск в лабораторных и заводских условиях и получен необходимый объем практических результатов, доказывающих высокую эффективность и надежность разработанного метода НК.

2. В заводских условиях продемонстрированы функциональные возможности выявления структурных неоднородностей и технологических дефектов электрическим методом НК непосредственно в процессе производства реакторного оборудования. Измерения выполнены на подготовленных образцах оборудования следующих наименований:

- парогенератор ПГВ-1000М, №10, сварные соединения №111 для обоих коллекторов;
- коллектор пара, чертеж детали АМ110.05.04.000, №10. Сварные швы №3-6, №3-7, №3-9 и №3-10;
- клапан обратный АИЦН1218.1400.160302;
- труба с наплавкой И, №5, АМ 117.03.02.540.

3. Полученные результаты подтверждают высокую надежность и преимущества выявления дефектов в сварных соединениях и других объектах контроля электрическим методом НК. Результаты электрического НК были сопоставлены с результатами УЗК и РГК для всех исследованных объектов контроля и показали адекватное соответствие.

4. В ходе выполнения совместной исследовательской работы были разработаны измерительные методики и проекты технологических карт электрического неразрушающего контроля. Определены необходимые условия и приняты меры по созданию информационно-измерительной системы и измерительных устройств электрического контроля для практической реализации метода СКП на площадке Филиала АО «АЭМ-технологии «Атоммаш» г. Волгодонск.

5. В качестве пилотного проекта по внедрению электрического метода рекомендуется организовать на площадке Филиала АО «АЭМ-технологии «Атоммаш» г. Волгодонск в ОМНК группу электрического неразрушающего контроля. Обучить дефектоскопистов и обеспечить отдел необходимой аппаратурой электрического НК.

6. Адаптация измерительных средств и методик электрического контроля для производственных условий позволит выполнять текущий контроль технического состояния объектов без вывода их из эксплуатации. Следует подчеркнуть, что в настоящее время метод СКП является единственным безальтернативным измерительным средством с точки зрения возможностей и оперативной реализации, а также объема и надежности получаемой информации о материалах и изделиях внутри активной зоны работающего реактора.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сурин, В.И. Применение метода сканирующей контактной потенциометрии для регистрации образования зародышевой трещины в сталях / В.И. Сурин, В.И. Польский, А.В. Осинцев, П.С. Джумаев // Дефектоскопия. – 2019. – № 1. – С. 53-60.
2. Методы электрофизической диагностики и контроля реакторного оборудования / В.И. Сурин, З.С. Волкова, Р.А. Денисов [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 4(21). – С. 51-62.
3. Отчет о НИОКТР. Электрофизический неразрушающий контроль сварных швов парогенератора ПГВ 1000 в Ресурсном центре НИЯУ МИФИ на площадке «АЭМ-технологии «Атоммаш» в г. Волгодонске / В.Г. Бекетов, А.Е. Дембицкий, В.В. Кондаков, [и др.] // Отчет о НИОКТР, НИЯУ МИФИ, 2017, рег. № АААА-А19-119032190046-8. – 118 с.
4. Mupati O., Sahu S., Pal S.K., Srirangam P. An investigation of mechanical and electrical properties of friction stir welded Al and Cu for battery pack application // Materials chemistry and physics, 287, 2022, 126373, <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126373>.
5. Chuan J., Wenbiao G., Wei L., Fan J., Wenquan W. Microstructure and mechanical/conductivity properties of pure copper joint welded by friction stir welding // China welding, 2020. Vol. 29. № 3. P. 26-32.
6. Electrical conductivity field analysis for evaluation of FSW joints in AA6013 and AA7075 alloys // Journal of Materials Processing Technology, <https://www.researchgate.net/publication/251609849>.
7. Bermejo M.A.V, Hurtig K., Eyzor D., Karlsson L. A new approach to the study of multi-pass-welds-microstructure and properties of welded 20-mm-thick superduplex stainless steel // Appl. Sci., 2019. Vol. 9, P.1050.
8. Tomkow J., Janeczek A. Underwater in situ local heat treatment by additional stitches for improving the weldability of steel // Appl. Sci., 2020. V.10, P.1823.
9. Ушаков, В.М. К вопросу чувствительности ультразвукового контроля сварных соединений объектов энергетики / В.М. Ушаков, В.Н. Данилов // Дефектоскопия. – 2019. – № 10. – С. 3-13.
10. Ключев, В.В. Теория и практика радиационного контроля / В.В. Ключев, Ф.Р. Соснин. – Москва : Машиностроение, 1998. – 170 с.
11. Зуев, В.М. Радиографический контроль сварных соединений / В.М. Зуев, Р.Л. Табакман, Ю.И. Удралов. – Санкт-Петербург : Энергоатомиздат, 2001. – 143 с.
12. ГОСТ 7512-82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 19 с.

REFERENCES

- [1] Surin V.I. Primenenie metoda skaniruyushchej kontaktnoj potenciometrii dlya registracii obrazovaniya zarodyshevoj treshchiny v stalyah [Application of Scanning Contact Potentiometry for Nucleation Cracking in Steels], Defektoskopiya [Defectoscopy], 2019, No. 1, pp. 53-60 (in Russian).
- [2] Surin V.I., Volkova Z.S. Metody elektrofizicheskoy diagnostiki i kontrolya reaktornogo oborudovaniya [Methods of Electrophysical Diagnostics and Control of Reactor Equipment], Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety], 2016, no. 4(21), pp. 51-62 (in Russian).
- [3] Otchet o NIOKTR. Elektrofizicheskij nerazrushayushchij kontrol' svarnyh shvov parogeneratora PGV 1000 v Resursnom centre NIYAU MIFI na ploshchadke «AEM-tekhnologii «Atomash» v g. Volgodonske [Research and Development Report. Electrophysical Non-Destructive Inspection of PGV 1000 Steam Generator Welds at the MEFPI Resource Centre at the Atomash AEM-

- technologies site in Volgodonsk], Otchet o NIOKTR, NIYAU MIFI, 2017, registracionnyj nomer AAAA-A19-119032190046-8 [Research and Development Report, NRNU MEPhI, 2017, registration number AAAA-A19-119032190046-8], 118 p. (in Russian).
- [4] Mypati O., Sahu S., Pal S.K., Srirangam P. An Investigation of Mechanical and Electrical Properties of Friction Stir Welded Al and Cu for Battery Pack Application // Materials Chemistry and Physics, 287, 2022, 126373, <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126373> (in English).
- [5] Chuan J., Wenbiao G., Wei L., Fan J., Wenquan W. Microstructure and Mechanical/Conductivity Properties of Pure Copper Joint Welded by Friction Stir Welding // China Welding, 2020, Vol. 29, № 3, p. 26-32 (in English).
- [6] Electrical Conductivity Field Analysis for Evaluation of FSW Joints in AA6013 and AA7075 Alloys//Journal of Materials Processing Technology, <https://www.researchgate.net/publication/251609849> (in English).
- [7] Bermejo M.A.V, Hurtig K., Eyzor D., Karlsson L. A New Approach to the Study of Multi-Pass-Welds-Microstructure and Properties of Welded 20-mm-thick Superduplex Stainless Steel // Appl. Sci., 2019, Vol. 9, pp.1050 (in English).
- [8] Tomkow J., Janeczka A. Underwater in Situ Local Heat Treatment by Additional Stitches for Improving the Weldability of Steel// Appl. Sci., 2020, V. 10, P.1823 (in English).
- [9] Ushakov V.M. K voprosu chuvstvitel'nosti ul'trazvukovogo kontrolya svarnyh soedinenij ob'ektov energetiki [Sensitivity of Ultrasonic Testing of Welded Joints of Power Engineering Facilities], Defektoskopiya [Defectoscopy], 2019, no.10, pp. 3-13 (in Russian).
- [10] Klyuev, V.V. Teoriya i praktika radiacionnogo kontrolya [Theory and Practice of Radiation Control] Moskva: Mashinostroenie [Moscow: Mechanical Engineering], 1998, 170 p. (in Russian).
- [11] Zuev, V.M. Radiograficheskij kontrol' svarnyh soedinenij [Radiographic Inspection of Welded Joints]. St. Petersburg: Energoatomizdat, 143 p. (in Russian).
- [12] GOST 751-82. Kontrol' nerazrushayushchij. Soedineniya svarnye. Radiograficheskij metod [State Standard 7512-82. Non-Destructive Testing. Welded Joints. Radiographic Method]. Moscow: Standartinform, 2008, 19 p. (in Russian).

Justification of Scanning Contact Potentiometry Applicability to Test NPP Equipment during its Manufacture

© 2023 Vitaly I. Surin¹, Alexander S. Shcherban², Alexander A. Shcherbakov³, Maxim E. Zhidkov⁴, Sergey A. Tomilin⁵, Mikhail B. Ivanyi⁶

^{1,3,6}National Research Nuclear University «MEPhI», Kashirskoyeshosse, 31, Moscow, Russia 1154091
^{2,4}«Atommash» the branch of JSC «AEM-Technologies», Volgodonsk, Zhukovskoe highway, 10, Rostov region, Russia, 347360

⁵Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360

¹VISurin@mephi.ru, ORCID iD: 0000-0001-6153-0206

²shcherban_as@atommash.ru

³AAScherbakov@mephi.ru

⁴zhidkov_me@atommash.ru

⁵SATomilin@mephi.ru, ORCID iD: 0000-0001-8661-8386

⁶MBIvanii@mephi.ru

Поступила в редакцию 11/30/2022

После доработки 02/08/2023

Принята к публикации 02/21/2023

Abstract. The method of scanning contact potentiometry (SCP) was investigated in factory conditions and functional capabilities of electric non-destructive testing (NDT) method to detect structural heterogeneities and technological defects were demonstrated directly in the process of reactor equipment production.

Keywords: electrical non-destructive testing, scanning contact potentiometry method, technical diagnostics and non-destructive testing of reactor equipment.

For citation: Surin V.I., Shcherban A.S., Shcherbakov A.A., Zhidkov M.E., Tomilin S.A., Ivanyi M.B. Justification of Scanning Contact Potentiometry Applicability to Test NPP Equipment During its Manufacture // Global Nuclear Safety. 2023. No. 1(46). P. 36-53 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2023-01-04>.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.5
DOI 10.26583/gns-2023-01-05
EDN MXCNRN

**ПРИМЕНЕНИЕ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ АГЛОМЕРАТИВНОЙ
КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ БИБЛИОТЕКИ БАЗОВЫХ
КЛАССОВ АКУСТИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ РЕАКТОРНОЙ
УСТАНОВКИ С ВВЭР-1000/1200**

© 2022 Геннадий Викторович Аркадов¹, Ирина Владимировна Трыкова²,
Денис Валерьевич Звягинцев³, Константин Игоревич Коцоев⁴

^{1,2,3,4} Акционерное общество «Научно-технический центр «Диалом», Обнинск, Калужская обл., Россия

⁴ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

¹ skrepka1964@gmail.com

² trykova@kvantprogramm.ru

³ zvyagincev@diaprom.ru

⁴ kotsoev@kvantprogramm.ru

Аннотация. В реакторных установках с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР) возможно появление в главном циркуляционном контуре (ГЦК) свободных, слабозакрепленных и посторонних предметов, представляющих угрозу целостности оборудования и безопасности РУ. С целью раннего обнаружения этих предметов РУ оснащается системой обнаружения свободных/слабозакрепленных предметов (СОСП). Помимо обнаружения свободных/слабозакрепленных предметов, в функции СОСП входит классификация зарегистрированных событий. Возможность применения алгоритма классификации основывается на том, что сигналы от срабатывания штатного оборудования отличаются большей степенью повторяемости, даже при наличии шума, в то время как свободный предмет характеризуется большим стохастическим компонентом и для него не может быть сформирован свой детерминированный класс. Классификация уменьшает число ложных тревог, позволяя выделить сигналы от штатных операций, при этом сигналы от одного процесса должны быть отнесены к одному классу. Идея статьи заключается в том, чтобы «обучить» СОСП на некотором архиве данных, характеризующих штатное функционирование РУ, создать библиотеку «базовых» классов и выставить границы каждого класса так, чтобы, с одной стороны, учесть возможную вариабельность параметров сигналов вследствие шума. Определив базовые классы, мы можем утверждать, что, если вновь поступивший сигнал попадает в один из классов, то он отражает штатное функционирование РУ, в то время как сигналы, не попавшие ни в один из классов, могут быть следствием появления свободного/слабозакрепленного предмета. В статье проанализировано множество событий, накопленных в архиве одной из действующих СОСП. Произведена их кластеризация, в результате чего выделены классы событий, соответствующие штатным технологическим операциям. Для каждого класса вычислен центр класса и допустимые границы отклонений от центра. Все полученные центры классов представляют собой эталоны, по которым СОСП в реальном времени либо классифицирует вновь обнаруженное событие, либо характеризует его как «неклассифицированное».

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

Для цитирования: Аркадов Г.В., Трыкова И.В., Звягинцев Д.В., Коцоев К.И. Применение иерархической агломеративной кластеризации для создания библиотеки базовых классов акустических событий реакторной установки с ВВЭР-1000/1200 // Глобальная ядерная безопасность. – 2023. – № 1(46). – С. 54-66 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2023-01-05>.

Поступила в редакцию 23.11.2022
После доработки 31.01.2023
Принята к публикации 13.02.2023

Введение

СОСП является средством автоматического обнаружения акустических событий, регистрируемых акселерометрами, смонтированными на ГЦК РУ [1-4]. Основной целью СОСП является обнаружение на ранней стадии свободных и слабозакрепленных предметов в первом контуре. Но, помимо этой прямой задачи, есть еще ряд важных вопросов, которые необходимо решать в рамках диагностирования РУ.

Одной из таких задач является классификация акустических событий, имеющих технологическое происхождение и соотнесение их с реальными технологическими процессами. Технологические операции имеют, как правило, воспроизводимый «акустический портрет». Например, срабатывание определенной арматуры дает один и тот же переходный процесс. То есть этот процесс можно отнести к детерминированным процессам.

Эксплуатация СОСП показала, что детерминированные акустические события могут быть зарегистрированы вследствие:

- 1) теплогидравлических процессов;
- 2) штатных технологических операций или изменения состояния/режима работы энергоблока (включая процедуры опробования и испытания оборудования);
- 3) вибраций оборудования и трубопроводов главного циркуляционного контура (ГЦК);
- 4) теплового перемещения оборудования в режимах разогрева/расхолаживания;
- 5) срабатывания запорно-регулирующей арматуры и роторного оборудования.

Однако идентифицировать событие, вызванное технологическими причинами, не всегда просто из-за сложности контролируемого оборудования, сложности систем, обеспечивающих его функционирование, огромного количества процессов, происходящих одновременно, достаточно высокого уровня шумов.

Одним из способов идентификации событий является составление библиотеки классов с заданными возможными отклонениями в диагностических признаках.

Классы таких событий называются «базовыми», они получаются методом кластеризации архивов данных, накопленных за определенный период функционирования РУ. Кластеры определяются на основе событий, у которых многократно повторяются характеристики (так называемые «кратные» события). Далее для каждого кластера определяется центр и допустимое отклонение от центра. Параметры каждого такого кластера участвуют в формировании соответствующего базового класса и задаются при настройке СОСП для конкретного энергоблока.

При функционировании СОСП в режиме реального времени, для каждого вновь зарегистрированного события вычисляются соответствующие признаки. Классификация состоит в покомпонентном сравнении текущего вектора признаков со всеми «базовыми» векторами.

Если все компоненты текущего вектора совпали со всеми компонентами некоторого базового вектора (с учетом допустимого отклонения), то считается, что классификация успешно завершена. Пользователю СОСП сообщается, что обнаруженное событие принадлежит такому-то классу, соответствующему совпавшему образу-эталону. Если текущий вектор не совпал ни с одним базовым, то пользователю сообщается, что обнаруженное событие не классифицировано, классификация откладывается на отсроченный анализ (и возможно, это сигнал от свободного/слабозакрепленного предмета).

Данные для кластеризации

В качестве исследуемого множества событий были взяты архивы, накопленные одной из действующих СОСП РУ с ВВЭР-1200. Для кластеризации использовались 3967 событий.

Датчики измерительных каналов СОСП установлены на горячих и холодных коллекторах парогенераторов (ПГ), на верхней части корпуса ПГ, на холодных трубопроводах, а также на ГЦН [2]. «Событие», регистрируемое СОСП, представляет собой запись сигналов со всех акустических датчиков синхронно в одном и том же временном интервале длиной 60 мс, т.е. одно событие – это массив из 20 временных реализаций (рис. 1). Временные реализации сигналов события – это записи входных процессов, представляющие 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. записи фоновых шумов и 40 мс. записи после регистрации превышения установленного порога.

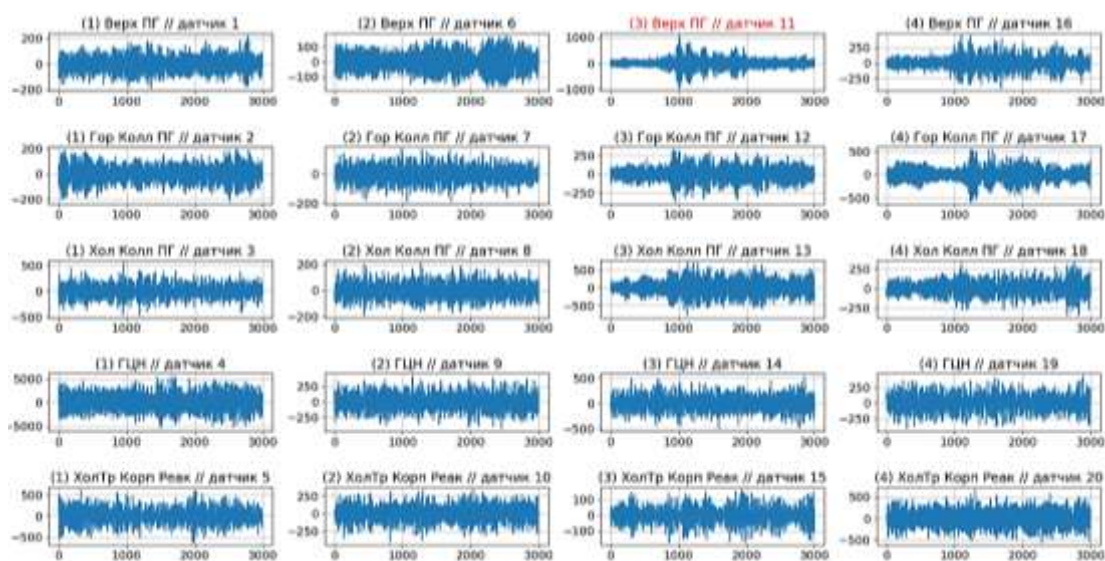


Рисунок 1 – Событие по петле 3, БК №11 [Loop 3 activity, BC No. 11]

Каждое событие переводится в признаковое пространство векторов. Диагностические (классификационные) векторы признаков регистрируемых СОСП событий вычисляются на основе временных реализаций отдельных сигналов события (рис. 2).

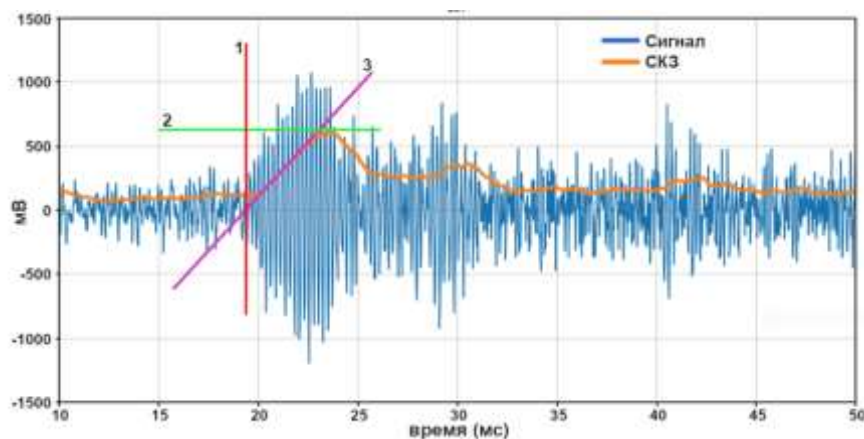


Рисунок 2 – Пример определения диагностических признаков: 1 – время прихода переднего фронта; 2 – максимум СКЗ; 3 – крутизна переднего фронта [Example of defining diagnostic features: 1 – arrival time of the leading edge; 2 – maximum RMS value; 3 – steepness of the leading edge]

После регистрации очередного события, из 20-ти временных реализаций, составляющих это событие, вычисляется среднеквадратичное значение (СКЗ) и текущий вектор, по которому производится классификация (рис. 3). Он состоит из 16-ти компонентов, которые, в свою очередь, собраны в 4 группы (4×4). Первая четвёрка – параметры первого сигнала (по времени прихода, то есть базового канала – БК), вторая – второго и т.д.: «N» – номер канала, «ВП N» – время прихода для канала N, «Кр N» – крутизна фронта, «СКЗ N» – максимум СКЗ для канала N.



Рисунок 3 – Вектор признакового пространства [Feature space vector]

Данное 16-мерное признаковое описание рассчитывается на основании 10 параметров 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.

Ключевым признаком события является номер БК – номер канала датчика, который первым зарегистрировал прохождение фронта волны от удара. Номер БК характеризует локализацию источника [5], максимум СКЗ характеризует энергию акустического сигнала.

Следует отметить, что кластеризация по всем 16-ти значениям используется только для сигналов очень большой амплитуды, таких, например, как сигнал от импульсных молотков [6], используемых для проверки работоспособности измерительных каналов СОСП. Для кластеризации сигналов от штатных операций используются значения для каналов N1 и N2, значения для каналов N3 и N4 – игнорируются. Данный подход обусловлен тем, что на РУ во время штатного функционирования возникает большое количество шумов различной природы и определить время прихода уже третьего канала (после БК) – затруднительно.

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

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

где k – окно усреднения для вычисления СКЗ;

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

Алгоритм получения первичных кластеров

Перед применением агломеративной кластеризации, необходимо выделить первичные кластеры. В теории распознавания образов выделяют три подхода к задаче синтеза первичных образов [7]:

- 1) принцип сравнения с эталоном;
- 2) принцип кластеризации;
- 3) принцип общности свойств.

Несколько алгоритмов кластеризации (принцип кластеризации) событий СОСП, были рассмотрены нами в работе «Кластеризация акустических событий в главном циркуляционном контуре реакторной установки с ВВЭР-1000/1200, обусловленных штатными технологическими операциями» [8]. В настоящей статье предпочтение было отдано детерминированному алгоритму (принцип сравнения с эталоном). Этот алгоритм применим для малого, вплоть до двух событий, набора данных (в отличие от приведенных в [8]). В основу положен метод, аналогичный алгоритму К внутригрупповых средних [7]:

1) для каждого компонента вектора признаков задаются минимально разумные пороги «от» и «до», далее в качестве центра первого кластера берется событие из архива, выделяются все события, попадающие в заданные границы, и уточняется центр кластера;

2) далее происходит итеративное уточнение центров кластеров, с целью минимизации суммы квадратов внутригрупповых расстояний. Внутри каждого, полученного на шаге 1 кластера, рассчитываются новые центры кластеров X_k . При этом предполагается, что сумма квадратов расстояний $\|x - X_k\|$ по всем x из k -го кластера должна быть минимальной. В этом случае центр X_k является выборочным средним для данного кластера и вычисляется по формуле (2):

$$X_k = \frac{1}{N_k} \sum_{j=1}^{N_k} x_j, \quad (2)$$

где N_k – количество образов x_j в k -м кластере;

3) если рассчитанные на шаге 2 новые центры совпадают с центрами, рассчитанными на предыдущей итерации (или отличаются от них не более чем на заданную величину ε), процесс заканчивается. В противном случае переходим к шагу 2.

Доказательство сходимости метода К внутригрупповых средних было получено в работе [9].

Недостатком всех вышеописанных алгоритмов является то, что, как правило, формализуется большое число кластеров (вследствие большого уровня шума, вариабельности параметров и неточностей определения компонент вектора признаков), что приводит к низкому проценту кластеризации и ограниченной применимости полученных классов для дальнейшего анализа акустических событий в режиме реального времени.

При этом одному и тому же физическому процессу ставится в соответствие несколько различных кластеров (т.е. нарушается принцип «один процесс – один класс»), что приводит к ухудшению быстродействия СОСП и сложностям при идентификации события по его классу. Также нередко возникает ситуация, когда априори известно, какие из событий СОСП заведомо относятся к одному классу, и требуется уточнить границы этого класса.

Например, на рисунке 4 показаны 2 различных кластера, которые относятся к одному и тому же событию (удары импульсных молотков), но при этом, формально различны (различие в номере четвертого канала, которое для каналов 15 и 20 не является существенным, но требует уточнения границ кластера).

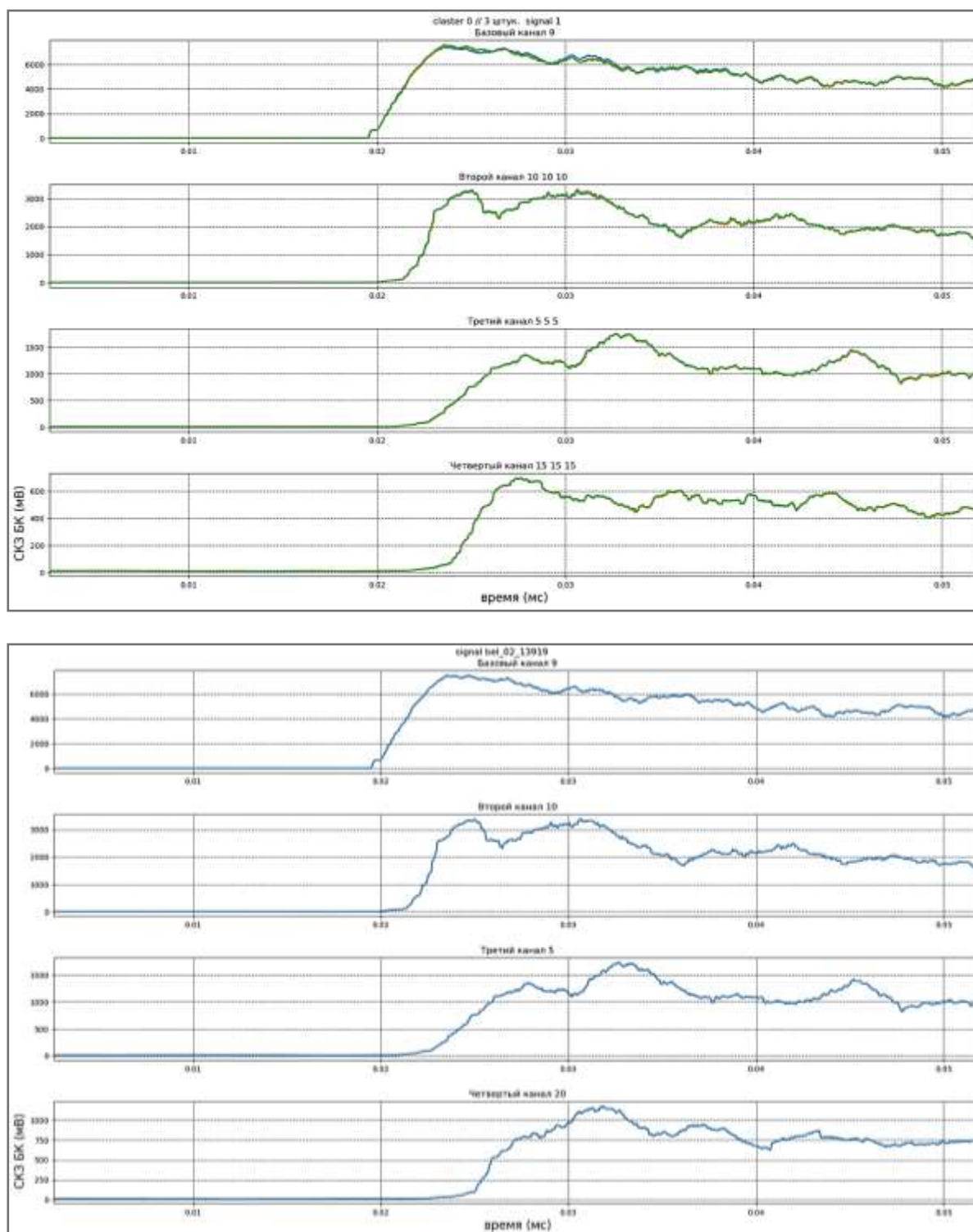


Рисунок 4 – События одного кластера, различающиеся по четвертому каналу [Activities of the same cluster, differentiated by fourth channel]

Для решения задачи уменьшения количества кластеров и повышения процента кластеризованных событий был применен алгоритм иерархической агломеративной кластеризации [10, 11]. При таком подходе наиболее близкие друг к другу центры первичных кластеров объединяются в один кластер, после чего уточняется центр нового, объединенного кластера и его допустимые границы. При этом оператор имеет возможность вручную задать максимальное отклонение от центра кластера (если он имеет некоторую априорную информацию о допустимом разбросе данных внутри кластера, что позволяет контролировать укрупнение кластеров).

Алгоритм иерархической агломеративной кластеризации

Идея иерархической агломеративной кластеризации основывается на последовательном объединении индивидуальных объектов или их кластеров во все более крупные кластеры. Результат работы алгоритма кластеризации представляет собой древовидную структуру или дендрограмму [12]. Исходя из дендрограммы определяется оптимальное количество кластеров.

Дендрограмма представляет собой визуальное представление меры расстояния между отдельными кластерами и визуально представляет каждый шаг процесса последовательного укрупнения кластеров. На двумерном графике по горизонтальной оси откладываются номера всех кластеров, а по вертикальной – расстояние между ними (рис. 5).

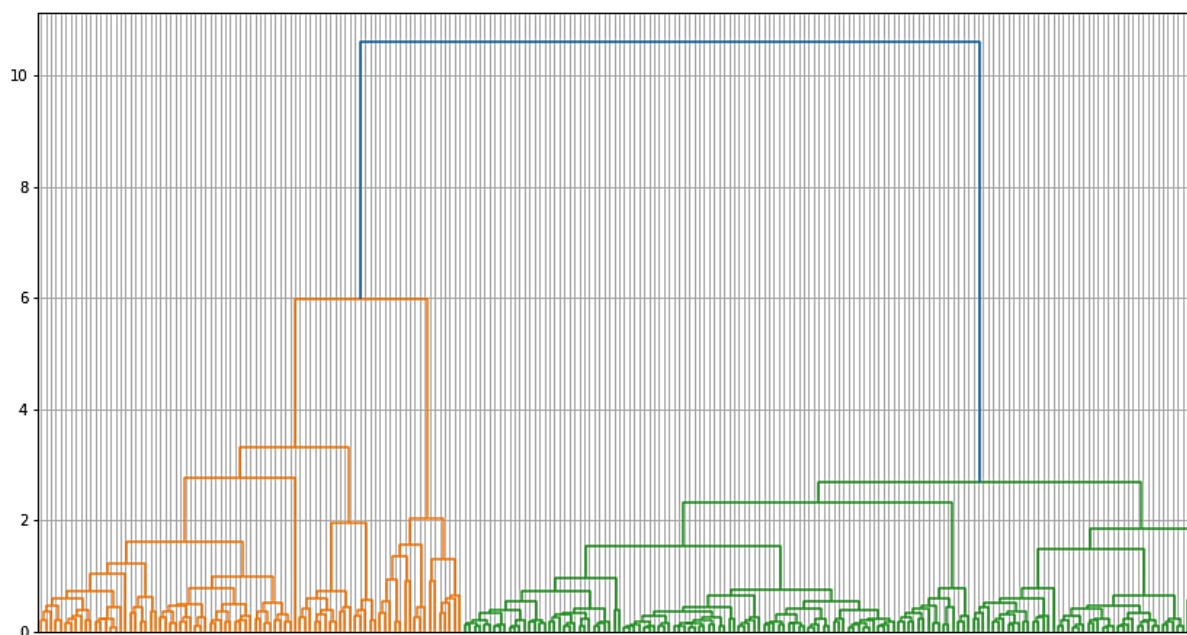


Рисунок 5 – Дендрограмма кластеров по БК 12 [Dendrogramme of clusters by BC 12]

При этом существует несколько методов вычисления расстояния между отдельными кластерами:

1) метод одиночной связи (single linkage) – «метод ближайшего соседа». Расстояние $D(A, B)$ между двумя кластерами A, B полагается равным минимальному расстоянию между двумя элементами из разных кластеров, выражение (3):

$$D(A, B) = \min \{d(a, b) : a \in A, b \in B\}, \quad (3)$$

где $d(a, b)$ – расстояние между элементами кластеров A и B ;

2) метод полной связи (complete linkage) также известен как «метод дальнего соседа». Расстояние между двумя кластерами полагается равным максимальному расстоянию между двумя элементами из разных кластеров, выражение (4):

$$D(A, B) = \max \{d(a, b) : a \in A, b \in B\}, \quad (4)$$

где $d(a, b)$ – расстояние между элементами кластеров A и B ;

3) метод средней связи (pair-group method using arithmetic mean) – расстояние между двумя кластерами полагается равным среднему расстоянию между элементами этих кластеров, выражение (5):

$$D(A, B) = \frac{1}{|A| \cdot |B|} \sum_{a \in A} \sum_{b \in B} d(a, b), \quad (5)$$

где $d(a, b)$ – расстояние между элементами кластеров A и B , а $|A|$ и $|B|$ – мощности кластеров;

4) центроидный метод (pair-group method using the centroid average) – расстояние между кластерами полагается равным расстоянию между их центрами, выражение (6) [13]:

$$D(A, B) = \|c_A - c_B\|, \quad (6)$$

где c_A и c_B – центроиды кластеров A и B , соответственно;

5) метод Уорда (Ward's method). В отличие от других методов кластерного анализа, для оценки расстояний между кластерами здесь используются методы дисперсионного анализа. В качестве расстояния между кластерами берётся прирост суммы квадратов расстояний объектов до центра кластера, получаемого в результате их объединения, выражение (7) [14]:

$$D(A, B) = \sum_i (x_i - \bar{x})^2 - \sum_{x_i \in A} (x_i - \bar{a})^2 - \sum_{x_i \in B} (x_i - \bar{b})^2. \quad (7)$$

На каждом шаге алгоритма объединяются такие два кластера, которые приводят к минимальному увеличению дисперсии. Этот метод применяется для задач с близко расположенными кластерами.

В данной работе использовался метод Уорда, он показал наибольшую устойчивость по отношению к выбросам данных и наилучшие интуитивно понятные результаты, исходя из специфики данных (зашумленность и большое количество близко расположенных кластеров).

Поскольку одна из основных функций СОСП – обнаружение свободных и слабозакрепленных предметов, отдельно следует остановиться на возможности ошибок второго рода («пропуск цели») – ложной классификации свободных предметов как «штатных технологических операций».

В качестве целевого множества для агломеративной кластеризации были использованы уже найденные на первичном этапе центры кластеров, это позволило работать именно с уже обнаруженными кластерами, что исключает ошибочную кластеризацию сигналов от возможных свободных предметов в качестве сигналов от технологических операций.

При определении границ объединенных кластеров также использовалось предположение о связности множества допустимых значений внутри одного кластера (т.е. все значения из интервала «от» и «до» принадлежат кластеру). Это позволило существенно увеличить долю кластеризованных событий при одновременном уменьшении количества кластеров.

Пользователь имеет возможность выбора из двух стратегий, исходя из конечной цели кластеризации:

1) ориентируясь на дендрограмму, установить точное количество кластеров – режим нужен при условии, что доступна априорная информация о количестве кластеров, как, например, показано на рисунке 4. В этом случае границы кластеров вычисляются исходя из имеющихся данных;

2) установить максимально допустимое отклонение от центров кластеров, количество кластеров при этом вычисляется автоматически. Границы кластеров также вычисляются исходя из имеющихся данных.

Ориентируясь на визуальное представление кластеров, оператор может принять дальнейшее решение об увеличении (или уменьшении) отклонения от центров.

В таблице 1 показаны границы кластеров, найденные методом агломеративной кластеризации, для различных предельных отклонений от центров. Первая строка содержит результаты первичной кластеризации, без использования агломеративной.

Таблица 1 – Результаты кластеризации с разными пороговыми значениями [Clustering results with texture thresholds]

Отклонение от центров, %	от	БК11 (1715 событий)	БК12 (276 событий)	БК16 (418 событий)
Δ ВП1=5% Δ Кр1=10% Δ СК31=10% Δ ВП2=5% Δ Кр2=10% Δ СК32=10%		кластеров: 207 кластеризовано: 46.4%	кластеров: 33 кластеризовано: 29.3%	кластеров: 64 кластеризовано: 48.6%
Δ ВП1=10% Δ Кр1=30% Δ СК31=30% Δ ВП2=10% Δ Кр2=30% Δ СК32=30%		кластеров: 143 кластеризовано: 56.6%	кластеров: 21 кластеризовано: 40.2%	кластеров: 38 кластеризовано: 60.5%
Δ ВП1=20% Δ Кр1=40% Δ СК31=40% Δ ВП2=20% Δ Кр2=40% Δ СК32=40%		кластеров: 62 кластеризовано: 61.8%	кластеров: 21 кластеризовано: 40.2%	кластеров: 22 кластеризовано: 66.3%

Пороги каждого кластера вычисляются индивидуально, если кластер «узкий» изначально – он таким и остается (табл. 2).

Таблица 2 – Пример определения центров и пороговых значений кластеров [An example of determining the centers and threshold values of clusters]

№ кластера	N1	ВП1	Кр1	СК31	N2	ВП2	Кр2	СК32
1	11	17.84	89.01	393.86	12	18.69	36.3	177.9
Δ 1, %	0.0	6.28	16.58	13.72	0.0	8.00	22.75	19.56
2	11	15.32	33.98	405.23	12	27.14	38.76	164.61
Δ 2, %	0.0	5.34	11.45	11.00	0.0	6.05	10.27	10.96

На рисунке 6 показан один из полученных кластеров.

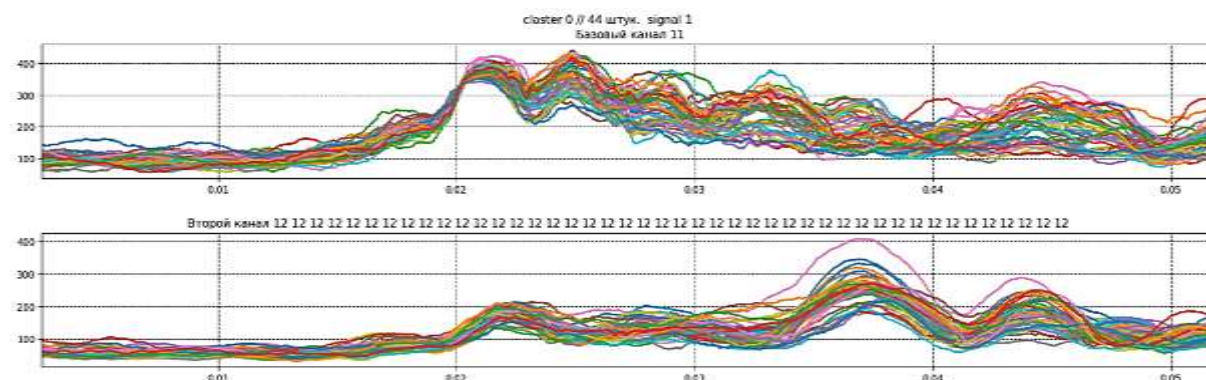


Рисунок 6 – Кластер по БК 11 [BC 11 cluster]

На рисунках 7, 8 приведено распределение количества кластеров с заданным числом элементов, до и после агломеративной кластеризации, соответственно. Видно, что число кластеров с двумя элементами существенно уменьшилось, соответственно, увеличилась универсальность полученных кластеров и, как следствие, быстродействие и устойчивость к случайному шуму классификации событий СОСП в целом.

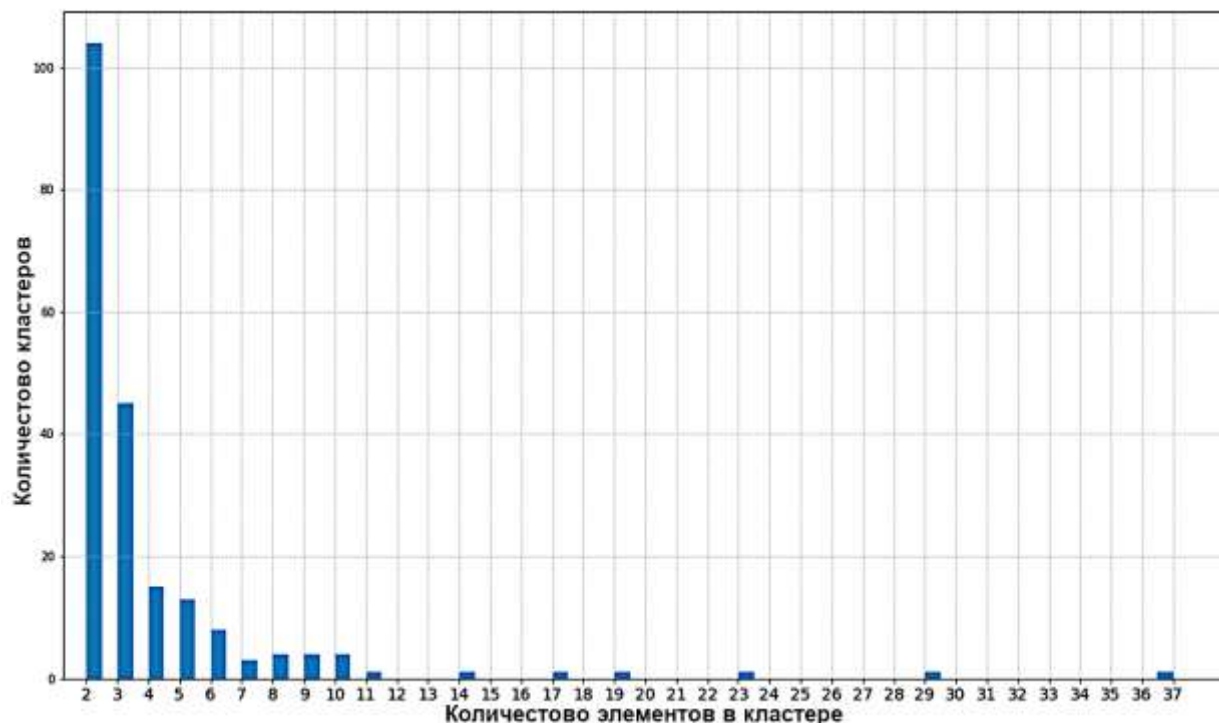


Рисунок 7 – Распределение при первичной кластеризации [Distribution in primary clustering]

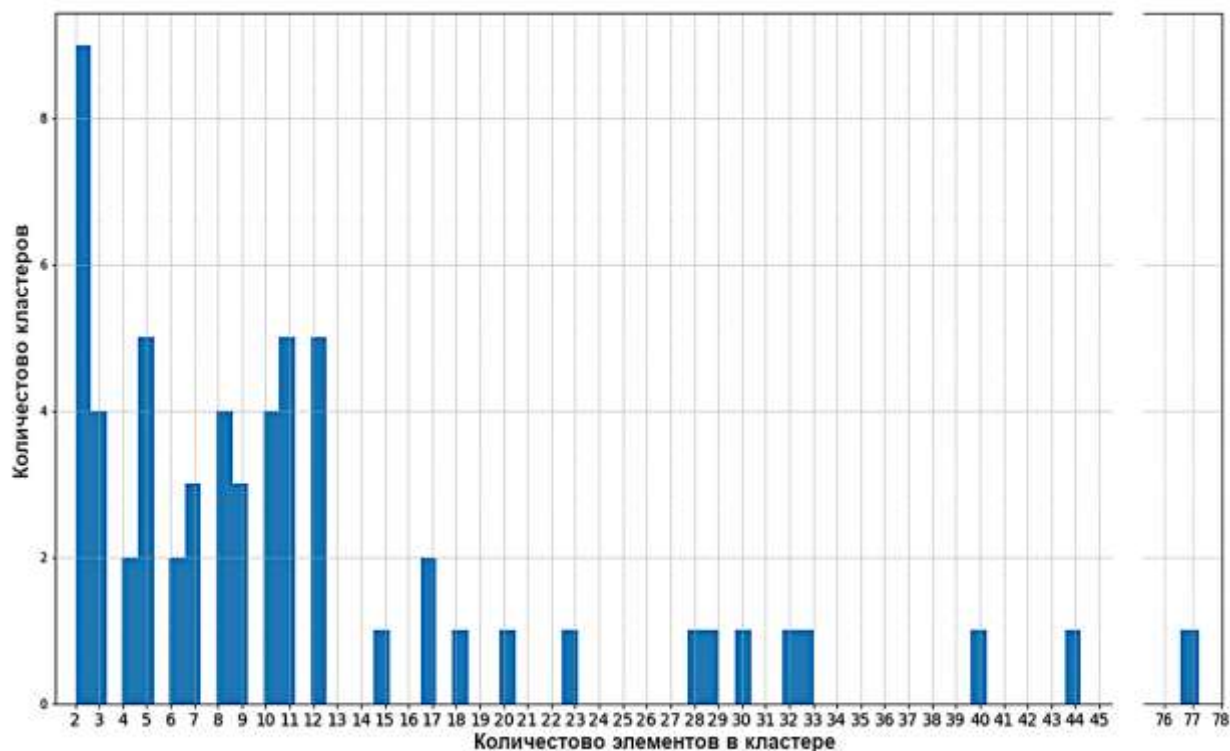


Рисунок 8 – Агломеративная кластеризация [Agglomerative clustering]

Выводы

1. Определены центры классов, соответствующих штатным операциям РУ, определены допустимые границы классов. Данные классы будут использоваться в качестве эталонов для дальнейшей классификации сигналов при работе СОСП в режиме реального времени.

2. Классификация ударов молотками произведена с высоким качеством, при весьма узких диапазонах разброса признаков. Процент классифицированных событий по БК с номерами 11, 12, 16 достаточно высок, что совокупно свидетельствует об эффективности разработанного алгоритма классификации.

3. Агломеративная кластеризация – эффективный способ борьбы с зашумлением данных и недостаточным количеством данных (заполнение пропусков в значениях признаков в предположении, что допустимые интервалы представляют собой связанные множества, это позволяет делать выводы при недостаточной статистике).

4. Разработанный алгоритм позволяет существенно уменьшить количество классов, и одновременно повышается доля кластеризованных событий, что приведет к повышению быстродействия и увеличению устойчивости к зашумлению данных СОСП в целом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Центр диагностики «Диапром». Сопровождение эксплуатации. – URL: <http://www.diaprom.com/about/operation> (дата обращения: 21.11.2022).
2. Центр диагностики «Диапром». Система обнаружения свободных предметов в главном циркуляционном контуре ВВЭР-1000 (СОСП). – URL: <http://www.diaprom.com/projects/?p=2> (дата обращения: 21.11.2022).
3. Аркадов, Г.В. Системы диагностирования ВВЭР / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, Б.М. Финкель. – Москва : Энергоатомиздат, 2010. – 391 с.
4. Воронов, А.В. Опыт использования систем обнаружения свободных и слабозакрепленных предметов в контуре циркуляции теплоносителя реакторных установок Нововоронежской АЭС / А.В. Воронов, М.Т. Слепов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2022. – № 2. – С. 15-26.
5. Максимов, И.В. Метод локализации удара для системы обнаружения свободных предметов в контуре циркуляции теплоносителя реакторных установок с ВВЭР / И.В. Максимов, В.В. Перевезенцев // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2019. – № 4. – С. 28-38.
6. Центр диагностики «Диапром». «Молоток импульсный ИМ-1». – URL: <http://www.diaprom.com/products/?p=14> (дата обращения: 21.11.2022).
7. Чабан, Л.Н. Теория и алгоритмы распознавания образов / Л.Н. Чабан. – Москва : Московский государственный университет геодезии и картографии, 2004. – 70 с.
8. Аркадов, Г.В. Кластеризация акустических событий в главном циркуляционном контуре реакторной установки с ВВЭР-1000/1200, обусловленных штатными технологическими операциями / Г. В. Аркадов, И. В. Трыкова, К. И. Коцоев // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 3(44). – С. 43-55.
9. Jain, A.K. Algorithms for Clustering Data / A.K. Jain, R.C. Dubes– Englewood Cliffs (NJ): Prentice-Hall, 1988. – 304 p.
10. Implementing Agglomerative Clustering using Sklearn – URL: <https://www.geeksforgeeks.org/implementing-agglomerative-clustering-using-sklearn/> (дата обращения: 21.11.2022).
11. Жамбю, М. Иерархический кластер-анализ и соответствия / М. Жамбю – Москва : Финансы и статистика, 1988. – 345 с.
12. Древовидная схема. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Древовидная_схема (дата обращения: 21.11.2022).
13. Sneath, P.H.A. Numerical taxonomy: The principles and practices of numerical classification / P.H.A. Sneath, R.R. Sokal – San-Francisco: Freeman, 1973. – 573 p. (in English).
14. Ward J.H. Hierarchical grouping to optimize an objective function / J.H. Ward // J. of the American Statistical Association. – 1963. V.58. P. 236-244.

REFERENCES

- [1] Centr diagnostiki «Diaprom» [Scientific and Technical Center «Diaprom»], Soprovozhdeniye ekspluatatsii [Operation support], <http://www.diaprom.com/about/operation> (accessed 11/21/2022) (in Russian).
- [2] Centr diagnostiki «Diaprom». [Scientific and Technical Center «Diaprom»], Sistema obnaryzheniya svobodnikh predmetov v glavnom tsyrculyatziionnom konture VVER-1000(SOSP) [System for Detecting Loose Objects in the Main Circulation Circuit of WWER-1000 (SDLO)], <http://www.diaprom.com/projects/?p=2> (accessed 11/21/2022) (in Russian).
- [3] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Finkel B.M. Systemy diagnostirovaniya VVER [WWER Diagnostic Systems]. Moskva: Energoatomizdat [Moscow: Energoatomizdat, publishing house], 2010, 391 p. (in Russian).
- [4] Voronov A.V., Slepov M.T. Opit ispolzovaniya system obnaruzheniya svobodnikh I slabozacreplennikh predmetov v konture tsirculyacii teplonositelya reaktornikh ustanovok Novovoronezhskoy AES [Experience of Detection Systems Use for Loose Parts and Weakly Fixed Objects in the Coolant Circulation Circuit of Novovoronezh NPP Reactor Installations], Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika, 2022, № 2, pp. 15-26 (in Russian) DOI: 10.26583/npe.2022.2.02
- [5] Maksimov I.V., Perevezencev V.V. Metod lokalizatsii udara dlya systemi obnaruzheniya svobodnikh I slabozacreplennikh predmetov v konture tsirculyacii teplonositelya reaktornikh ustanovok s VVER [A Localization Method of Loose Part of WWER], Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika, 2019, № 4, pp. 28-38 (in Russian) DOI 10.26583/npe.2019.4.02
- [6] Centr diagnostiki «Diaprom» [Scientific and Technical Center «Diaprom»], Molotok impulsniy IM-1 [Impulse Hammer IM-1], <http://www.diaprom.com/products/?p=14> (accessed 11/21/2022) (in Russian).
- [7] Chaban L.N. Teoriya I algoritmi raspoznavaniya obrazov [Theory and Algorithms of Pattern Recognition]. Moskva: Moskovskiy gosudarstvenniy universitet geodezii I kartographii [Moscow: Moscow State University of Geodesy and Cartography], 2004, 70 p. (in Russian).
- [8] Arkadov G.V., Trykova I.V., Kotsoev K.I. Klasterizatsia akusticheskikh sobityiy v glavnom tsirkulatsionnom konture reaktornoy ustanovki s VVER-1000/1200, obuslovlennikh shtatnimi technologicheskimi operatsiyami [Clustering of Acoustic Events in the Main Circulation Circuit of a WWER 1000/1200 Reactor Facility Caused by Normal Technological Operations] // Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2022, № 3(44), pp. 43-55 (in Russian).
- [9] Jain A.K., Dubes R.C. Algorithms for Clustering Data – Englewood Cliffs (NJ): Prentice-Hall, 1988. 304 p. (in English).
- [10] Implementing Agglomerative Clustering using Sklearn, <https://www.geeksforgeeks.org/implementing-agglomerative-clustering-using-sklearn/> (r accessed 11/21/2022) (in English).
- [11] 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).
- [12] Dendrogram, <https://en.wikipedia.org/wiki/Dendrogram> (accessed 11/21/2022) (in Russian).
- [13] Sneath, P.H.A., Sokal R.R. Numerical Taxonomy: The Principles and Practices of Numerical Classification. San-Francisco: Freeman, 1973, 573 p. (in English).
- [14] Ward J.H. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function // J. of the American Statistical Association, 1963, v.58, pp. 236-244 (in English).

**Application of Hierarchical Agglomerative Clustering to Create a Basic Classes
Database of WWER 1000/1200 Reactor Facility**

Gennadiy V. Arkadov¹, Irina V. Trykova², Denis V. Zvyagincev³, Konstantin I. Kotsoev⁴

^{1,2,3,4}Joint Stock Company "Scientific and Technical Center "Diaprom", Koroleva str., 6, Obninsk, Kaluga region, Russia 249031

⁴Bauman Moscow State Technical University, 2 Bauman str., 5/1, Moscow, Russia 105005

¹skrepka1964@gmail.com

²trykova@kvantprogramm.ru

³zvyagincev@diaprom.ru

⁴kotsoev@kvantprogramm.ru

Received by the editorial office on 11/23/2022

After revision on 01/31/2023

Accepted for publication 02/13/2023

Abstract. In reactor plants with a water-water power reactor (WWER) free, weakly fixed and foreign objects may appear in the main circulation circuit, posing a threat to the integrity of the equipment and the safety of the reactor plant. For the purpose of early detection of these objects, the NPP is equipped with a system for detecting loose/weakly fixed objects (SDLO). In addition to the detection of loose/weakly fixed objects, the functions of the SDLO include the classification of registered events. The possibility of applying the classification algorithm is based on the fact that the signals from the operation of standard equipment are highly repeatable, even in the presence of noise, while a free object is characterized by a large stochastic component and its own deterministic class cannot be formed for it. Classification reduces the number of false alarms, allowing you to select signals from regular operations, while signals from one process must be assigned to one class. The idea of the article is to "train" SDLO on a certain archive of data characterizing the normal functioning of the reactor plant, create a library of "base" classes and set the boundaries of each class so that, on the one hand, take into account the possible variability of signal parameters due to noise. Having defined the base classes, we can state that if a newly received signal falls into one of the classes, then it reflects the regular operation of the RI, while signals that do not fall into any of the classes may be the result of the appearance of a free/weakly fixed object. The article analyzes a lot of events accumulated in the archive of one of the existing SDLO. Their clustering was carried out, as a result of which the classes of events corresponding to regular technological operations were identified. For each class, the center of the class and the allowable limits of deviations from the center are calculated. All class centers obtained are benchmarks against which the SDLO either classifies a newly detected event in real time or characterizes it as "unclassified".

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

For citation: Arkadov G.V., Trykova I.V., Zvyagincev D.V., Kotsoev K.I. Application of Hierarchical Agglomerative Clustering to Create a Basic Classes Database of WWER 1000/1200 reactor facility // Global nuclear safety. 2023. No. 1(46). P. 54-66 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2023-01-05>.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.311.25 :620.179.13
DOI 10.26583/gns-2023-01-06
EDN ONHQIC

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ
РЕЗЕРВНОЙ ДИЗЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ АЭС
СОВМЕСТНО С ПОКАЗАНИЯМИ ШТАТНЫХ ПРИБОРОВ

© 2023 Елена Александровна Абидова¹, Прохор Владимирович Поваров²,
Владимир Михайлович Попов³, Дарья Александровна Прыткова⁴,
Ольга Юрьевна Пугачева⁵

^{1,2,4,5}Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

³Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция»

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

²nii_energomash@mail.ru

³info@vdpnp.rosenergoatom.ru

⁴nii_energomash@mail.ru

⁵OYPugacheva@mephi.ru

Аннотация. В рамках НИОКР по разработке комплексной автоматизированной системы тепловизионного контроля (КАС ТВК) выполнены аналитические исследования результатов тепловизионного контроля с использованием КАС ТВК совместно с соответствующими значениями результатов контроля температур, полученными в штатной системе контроля состояния ДГУ. Апробация КАС ТВК в условиях АЭС проводилась путем термографирования резервных дизель-генераторных установок АЭС типа 12zv40/48+S2445-12. Одновременно проводилась измерения параметров дизеля и генератора с помощью штатной системы контроля. Предложена методика, обеспечивающая анализ равномерности работы цилиндров дизеля, состояния подшипников коленчатого вала, состояния и качества вырабатываемой электроэнергии генератора, а также анализ работы систем смазки и охлаждения. Практическое применение методики демонстрирует соответствие температуры, измеренные штатной системой и КАС ТВК. Совместный анализ результатов, полученных штатной и разрабатываемой системой обеспечивает повышение глубины диагностического обследования и подтверждает информативность термографических параметров и качество работы измерительных каналов штатных систем. Значения параметров, полученные при анализе показателей штатной системы контроля, зарегистрированных при установившемся значении мощности, будут использованы при последующем диагностировании для установления тенденций изменения данных параметров.

Ключевые слова: тепловизионный контроль, равномерность работы дизеля, диагностика подшипников коленчатого вала, контроль качества электроэнергии, диагностика систем смазки и охлаждения.

Для цитирования: Абидова Е.А., Поваров П.В., Попов В.М., Прыткова Д.А., Пугачева О.Ю. Методика анализа тепловизионных параметров резервной дизельной электростанции АЭС совместно с показаниями штатных приборов // Глобальная ядерная безопасность. – 2023. – № 1(46). – С. 67-78 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2023-01-06>.

Поступила в редакцию 16.12.2022

После доработки 17.02. 2023

Принята к публикации 21.02.2023

Актуальность разработки КАС ТВК

Комплексная автоматизированная система хранения и анализа результатов термографического контроля оборудования АЭС (КАС ТВК), структура которой представлена на рисунке 1, разрабатывается в рамках договора между НИЯУ МИФИ и ЧУ «Наука и Инновации» с испытаниями и внедрением на Ростовской АЭС. Разработка КАС ТВК направлена на повышение качества диагностики оборудования и снижение вероятности внезапного отказа оборудования за счёт совершенствования процессов тепловизионного контроля [1].

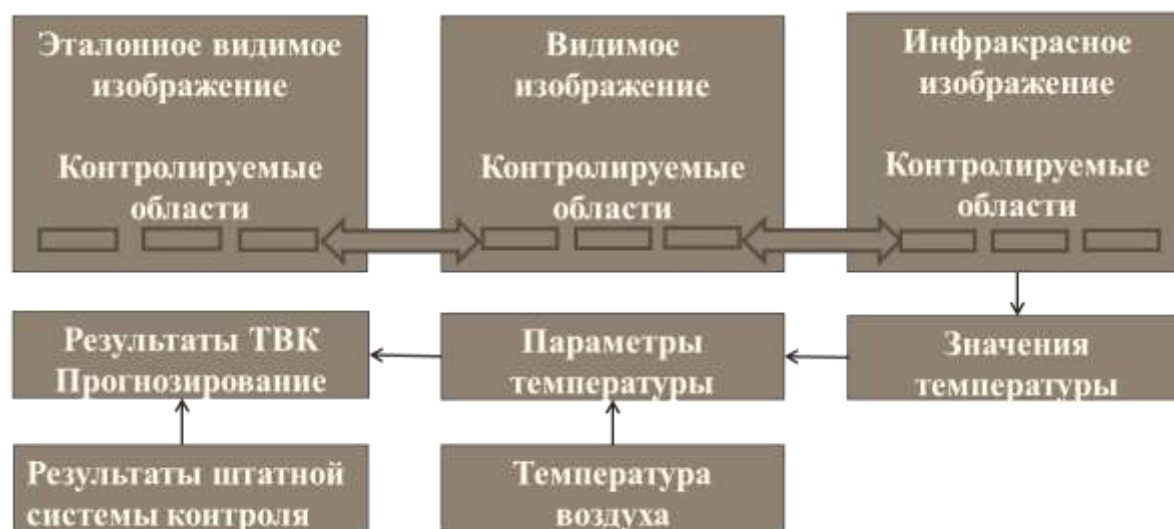


Рисунок 1 – Структура КАС ТВК [Structure of a complete automated thermal imaging control system]

Оптимизация процессов термографического обследования оборудования АЭС достигается путём максимального исключения ручной обработки и методически обоснованной алгоритмизации анализа полученных термографических данных, что соответствует стратегической цели снижения себестоимости выработки электроэнергии. Для формирования заключения о техническом состоянии обследуемой единицы оборудования разрабатываемая КАС ТВК должна на основе базы диагностических признаков, сформированной для разных видов оборудования, автоматически выявлять на термограмме место возможного дефекта.

КАС ТВК при регистрации термограмм извлекает из них термографическую информацию с сопутствующими данными (условиями тепловизионной съемки и параметрами настроек тепловизионного прибора) и сохраняет в своей внутренней базе данных [2]. В процессе регистрации данных обеспечивается визуализация процесса тепловизионного контроля и возможность корректировки данных в случае необходимости. КАС ТВК работает с термографическими снимками, полученными с помощью приборов тепловизионного контроля различных типов. Термограммы могут быть переданы в КАС ТВК как непосредственно с тепловизора, так и из удаленного сетевого хранилища.

По итогам третьего этапа база данных КАС ТВК заполнена результатами тепловизионного контроля оборудования Ростовской АЭС. Тестовые версии программного обеспечения и база данных КАС ТВК переданы на Ростовскую АЭС для испытаний и использования в работе. Объектами обследования является разнообразное оборудование. На данном этапе апробация КАС была проведена при диагностике РДЭС РоАЭС. Особенностью апробации была возможность сравнения результатов термографирования с показаниями штатных приборов. Совместный анализ термографических параметров и показаний штатных приборов позволил обосновать РИД.

Существующие методы тепловизионного контроля

Для диагностики поршневых двигателей широко используются комплексы аппаратно-программных средств на основе сопоставления контролируемых параметров с нормативными с учетом типа оборудования [3, 4]. Общим для всех анализируемых систем является возможность мониторинга и достоверной оценки состояния оборудования в процессе его эксплуатации без вывода из работы. Анализ достоинств и недостатков методов контроля дизель-генераторного оборудования и используемых для этого устройств, приведенных в отобранных патентах, показал, что ни один из них не удовлетворяет в полной мере требованиям [5, 6] оценки качества электроэнергии вырабатываемой генератором и проверки достоверности измерительных каналов системы контроля. С учетом указанных требований представляется целесообразной разработка методики диагностирования резервной дизельной электростанции АЭС, позволяющая:

- проверить информативность термографических параметров и качество работы измерительных каналов штатной системы;
- уточнить техническое состояние дизель-генератора;
- обеспечить дополнительный контроль качества генерируемой электрической энергии.

Следует отметить, что полноценная реализация методики диагностирования резервной дизельной электростанции возможна только при наличии постоянно пополняемой базы данных результатов оперативного контроля технического состояния и диагностики ответственного оборудования АЭС.

Методика анализа диагностических параметров КАС ТВК совместно с показаниями штатных приборов РДЭС

1. Методика анализа равномерности работы цилиндров по показаниям штатной системы контроля и КАС ТВК

В результате термографирования с помощью Системы должны быть получены температуры выхлопных патрубков. Одновременно штатной системой регистрируют температуры выхлопных газов по цилиндрам. Вычисляются средние значения температуры выхлопных газов [7].

Температуры выхлопных патрубков и средние значения температуры выхлопных газов не должны превышать 625°C , а разброс значений не более 120°C . При большем разбросе работа дизеля может считаться неравномерной.

Между выборками температуры, которые зарегистрированы тепловизором и штатной системой, должна быть положительная корреляция. Разность среднего значения температуры газов и температуры патрубка не должна превышать 30%. Если не наблюдается соответствия между выборками температуры, которые зарегистрированы тепловизором и штатной системой, то возможна ошибка регистрации при термографировании, либо сбой в одном из каналов измерения температуры штатной системы.

2. Методика анализа работы генератора по показаниям штатной системы контроля и КАС ТВК

При диагностике генератора проект методики КАС ТВК подразумевает термографирование подшипников генератора и щеточно-коллекторного аппарата [8].

Температура подшипника, зарегистрированная при термографировании, не должна превышать 70°C . Штатной системой измеряется температура воды на входе в подшипник генератора и температура воды на выходе из подшипника генератора. Температура воды на выходе из подшипника генератора должна положительно коррелировать с частотой вращения дизеля.

Температура щеточных механизмов генератора, зарегистрированная при термографировании, не должна превышать 100°C . В моменты изменения мощности, которые определяются исходя из показаний штатной системы, допустимо превышение температуры щеточных механизмов генератора.

Штатной системой также контролируются следующие показатели работы генератора:

- частота генератора;
- активная и реактивная мощности генератора;
- напряжение фазы А, В, С;
- ток фаз А, В, С;
- мощность генератора.

Данные показатели позволяют обеспечить дополнительный контроль качества генерируемой электрической энергии [9].

По показаниям активной P и реактивной мощности Q генератора возможно вычисление коэффициента мощности, формула (1):

$$\varphi = \arctg \frac{Q}{P}. \quad (1)$$

Анализ тока в фазах (при работе генератора на постоянной мощности) позволяет сопоставить средние значения в каждой из фаз I_a , I_b , I_c между собой и таким образом вычислить различие силы тока по фазам. Для этого вычисляется максимальное $I_{\max}$, минимальное $I_{\min}$ значение в выборке $\{I_a, I_b, I_c\}$, их соотношение, формула (2):

$$\Delta_I = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\min}}. \quad (2)$$

Анализ тока в фазах (при работе генератора на постоянной мощности) также позволяет вычислить коэффициенты пульсации тока в фазах путем сопоставления средних значений тока в каждой фазе с разностью между наибольшим и наименьшим значениями ΔI_a , ΔI_b , ΔI_c , формулы (3):

$$K_{пIa} = \frac{\Delta I_a}{I_a}, \quad K_{пIb} = \frac{\Delta I_b}{I_b}, \quad K_{пIc} = \frac{\Delta I_c}{I_c}. \quad (3)$$

Аналогично реализуется сопоставление средних значений напряжений в каждой из фаз U_a , U_b , U_c между собой. Для вычисления различия напряжения по фазам определяется максимальное $U_{\max}$, минимальное $U_{\min}$ значение в выборке $\{U_a, U_b, U_c\}$ и их соотношение, формула (4):

$$\Delta_U = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\min}}. \quad (4)$$

Аналогично путем сопоставления средних значений напряжения в каждой фазе с разностью между наибольшим и наименьшим значениями ΔU_a , ΔU_b , ΔU_c коэффициенты пульсации напряжения в фазах, формулы (5):

$$K_{пUa} = \frac{\Delta U_a}{U_a}, \quad K_{пUb} = \frac{\Delta U_b}{U_b}, \quad K_{пUc} = \frac{\Delta U_c}{U_c}. \quad (5)$$

Рекомендуется значения параметров генератора, полученные при анализе показателей штатной системы контроля, зарегистрированных при установившемся значении мощности, – коэффициента мощности, различие силы тока по фазам, коэффициенты пульсации тока в фазах, различия напряжения по фазам, коэффициенты пульсации напряжения в фазах, – сохранять в базе данных с целью установления

тенденций изменения параметров при последующем диагностировании. Указанные параметры генератора также целесообразно учитывать при контроле оборудования той же конструкции.

3. Методика анализа работы подшипников коленчатого вала

Проект методики диагностирования предполагает оценку работы подшипников коленчатого вала по термограммам смотровых лючков, на которые отбрасывается масло при вращении подшипников коленчатого вала. Определяется максимальное $T_{\max}$ и минимальное $T_{\min}$ значение температур на лючках $\{T_{л1}, T_{л2} \dots T_{л12}\}$, по которым оценивается разброс, выражение (6) [10]:

$$\Delta_T = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\min}} * 100\% . \quad (6)$$

Разброс температур больше 10% может косвенно свидетельствовать об отклонении в работе подшипника.

4. Методика анализа работы системы смазки

При диагностике системы смазки дизеля КАС ТВК подразумевает термографирование масляного насоса. Температура насоса не должна превышать 80°C [11].

Штатной системой также контролируются следующие показатели работы системы смазки:

- температура масла на входе в дизель;
- температура масла на выходе из дизеля;
- давление масла на дизеле (на входе в дизель);
- давление масла на дизеле (в дизеле);
- уровень масла в циркуляционной цистерне.

Температура масла на входе дизель – 50-60°C. Разность температур масла на входе и выходе из дизеля не должна превышать 12-14°C.

Рекомендуется значения параметров системы смазки, полученные при анализе показателей штатной системы контроля, зарегистрированных при установившемся значении мощности, сохранять в базе данных с целью установления тенденций изменения параметров при последующем диагностировании. Указанные параметры системы смазки также целесообразно учитывать при контроле оборудования той же конструкции.

5. Методика анализа работы системы охлаждения

При диагностике дизеля проект методики КАС ТВК подразумевает термографирование насосов внутреннего и промежуточного контуров охлаждения [12].

Температура насосов внутреннего и промежуточного контуров, зарегистрированная при термографировании, не должна превышать 80°C.

Штатной системой также контролируются следующие показатели работы системы охлаждения:

- температура воды внутреннего контура охлаждения на выходе из дизеля;
- уровень воды в расширительном баке внутреннего контура охлаждения;
- температура воды внутреннего контура охлаждения на входе в охладитель воды;
- температура воды промежуточного контура на входе в охладитель воды внутреннего контура;
- температура воды промежуточного контура на выходе из охладителя воды внутреннего контура.

Данные показатели позволяют обеспечить дополнительный контроль состояния работы системы охлаждения. Рекомендуется значения параметров системы охлаждения, полученные при анализе показателей штатной системы контроля, зарегистрированных при установившемся значении мощности, – температура воды

внутреннего контура охлаждения на выходе из дизеля; уровень воды в расширительном баке внутреннего контура охлаждения; температура воды внутреннего контура охлаждения на входе охладителя воды; температура воды промежуточного контура на входе охладителя воды внутреннего контура; температура воды промежуточного контура на выходе охладителя воды внутреннего контура, – сохранять в базе данных с целью установления тенденций изменения параметров при последующем диагностировании. Указанные параметры системы охлаждения также целесообразно учитывать при контроле оборудования той же конструкции.

Результаты практического применения методики

Апробация КАС ТВК в условиях АЭС проводилась путём термографирования резервных дизель-генераторных установок АЭС типа 12zv40/48+S2445-12: 1РДЭС-3 (17.08.2022); 2РДЭС-3 (18.08.2022); 2РДЭС-2 (15.09.2022). Одновременно проводились измерения параметров дизеля и генератора с помощью штатной системы контроля.

1. Анализ работы цилиндров по показаниям штатной системы контроля и КАС ТВК

В результате термографирования получены температуры выхлопных патрубков $T_{\text{патр}}$, которые сопоставляются со средними значениями температур выхлопных газов $T_{\text{газ}}$ по цилиндрам, измеренным штатной системой. Как показывают данные на рисунке 2, температуры выхлопных газов соответствуют норме (абсолютные значения не более 450 °С, разброс не более 120 °С).

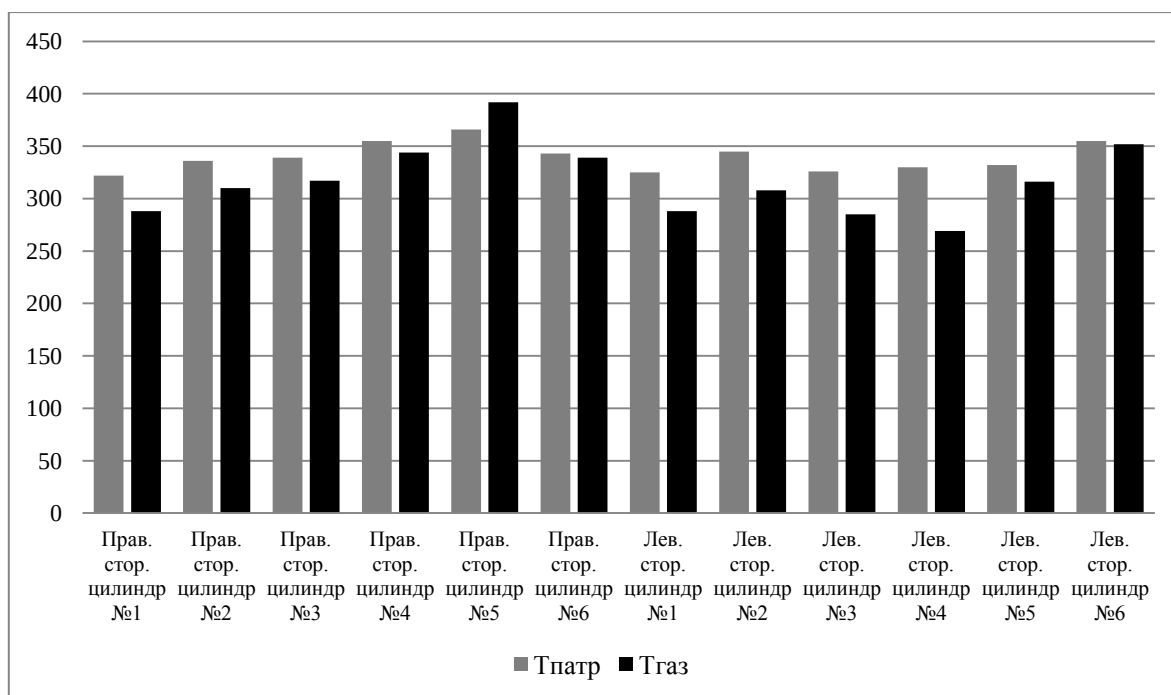


Рисунок 2 – Распределение температур выхлопных патрубков и температур выхлопных газов по цилиндрам 1РДЭС-3 Ростовской АЭС [Distribution of exhaust outlet temperatures and exhaust gas temperatures by cylinder 1 of the Rostov NPP RPP-3]

Наблюдается соответствие температуры, измеренные штатной системой и КАС ТВК.

2. Анализ работы генератора

В соответствии с проектом методики КАС ТВК выполнялось термографирование подшипников генератора S2445-12ДГУ 1РДЭС-3 2РДЭС-3, 2РДЭС-2 РоАЭС. Результаты представлены в таблице 1. Температура меньше предельно допустимой (70°С).

Таблица 1 – Температура подшипников генератора S2445-12 в составе ДГУ 12zv40/48 [Bearing temperature of S2445-12 alternator as part of 12zv40/48]

№	Объект	Дата	$T_{\text{подш}}, ^\circ\text{C}$
1	1РДЭС-3 (РоАЭС)	17.08.2022	59
2	2РДЭС-3 (РоАЭС)	18.08.2022	59
3	2РДЭС-2 (РоАЭС)	15.09.2022	58

Анализ температуры воды на выходе подшипника генератора 2РДЭС-3, зарегистрированный штатной системой контроля, показал положительную корреляцию между температурой и частотой вращения дизеля: подшипник нагревается и остывает после повышения и снижения соответственно скорости вращения.

Также согласно проекту методики термографированию подвергался щеточно-коллекторный аппарат генераторов 1РДЭС-3 2РДЭС-3, 2РДЭС-2. Результаты представлены в таблице 2. Для сравнения приводятся результаты термографирования ДГУ того же типа на Нововоронежской и Смоленской АЭС. Как видно, наибольшая температура щеточного механизма наблюдается на установке 1РДЭС-3. Возможно, рост температуры связан с набросом частоты вращения дизеля и соответственно с ростом частоты напряжения генератора, которые зафиксировала штатная система в период.

Таблица 2 – Температура щеточных механизмов генератора [Temperature of the alternator brushes]

№	Объект	Дата	$T_{\text{щет}}, ^\circ\text{C}$
1	1РДЭС-3 (РоАЭС)	17.08.2022	113
2	2РДЭС-3 (РоАЭС)	18.08.2022	95
3	2РДЭС-2 (РоАЭС)	15.09.2022	82
4	5ДГ-2 (НВ АЭС)	14.12.2020	50
5	1ДГ-3 (САЭС)	03.06.2019	69

Для контроля показателей качества электроэнергии генераторов 1РДЭС-3, 2РДЭС-2 и 2РДЭС-3 использовались измерительные центры MiCOM, с их помощью измерялись токи и напряжения в фазах, частота тока, активная и реактивная мощность.

По формуле (1) определены коэффициенты мощности 1РДЭС-3, 2РДЭС-2 и 2РДЭС-3 – 0,60; 0,66 и 0,66 соответственно.

Пульсация тока по формуле (2) составила 0,0227, 0,017, 0,017 для 1РДЭС-3; 0,093, 0,091, 0,092 для 2РДЭС-2; и 0,049, 0,047, 0,05 для 2РДЭС-3.

Пульсация напряжения в соответствии с формулой (4) для 1РДЭС-3 составила 0,0037, 0,0035, 0,0035. Напряжение 2РДЭС-3 и 2РДЭС-2 контролировалась в одной фазе, пульсация составила 0,0033 0,0034 и соответственно.

Различие напряжения в фазах, вычисленное по формулам (5), для 1РДЭС-3 составило 0,0013.

Штатные системы контроля 2РДЭС-3, 2РДЭС-2 позволяют установить следующие показатели работы генератора:

- температура воды в подшипник генератора 2РДЭС-2 37,81 $^{\circ}\text{C}$, 2РДЭС-3 38,21 $^{\circ}\text{C}$;
- температура воды из подшипника генератора 2РДЭС-2 40,53 $^{\circ}\text{C}$, 2РДЭС-3 39,75 $^{\circ}\text{C}$.

Значения параметров, полученные при анализе показателей штатной системы контроля, зарегистрированных при установившемся значении мощности, будут использованы при последующем диагностировании для установления тенденций изменения данных параметров.

3. Анализ работы подшипников коленчатого вала

Для оценки работы подшипников коленчатого вала в соответствии с проектом методики было проведено термографирование смотровых лючков дизелей 1РДЭС-3, 2РДЭС-3, 2РДЭС-2.

Сопоставление температур лючков трех дизелей согласно формуле 6 не указывает на отклонения в работе подшипников. Распределение температур смотровых лючков (рисунок 3) демонстрирует, что данные температуры по правому борту выше, чем по левому, а также, что температуры лючков 1РДЭС-3 и 2РДЭС-2 в целом выше, чем 2РДЭС-3.

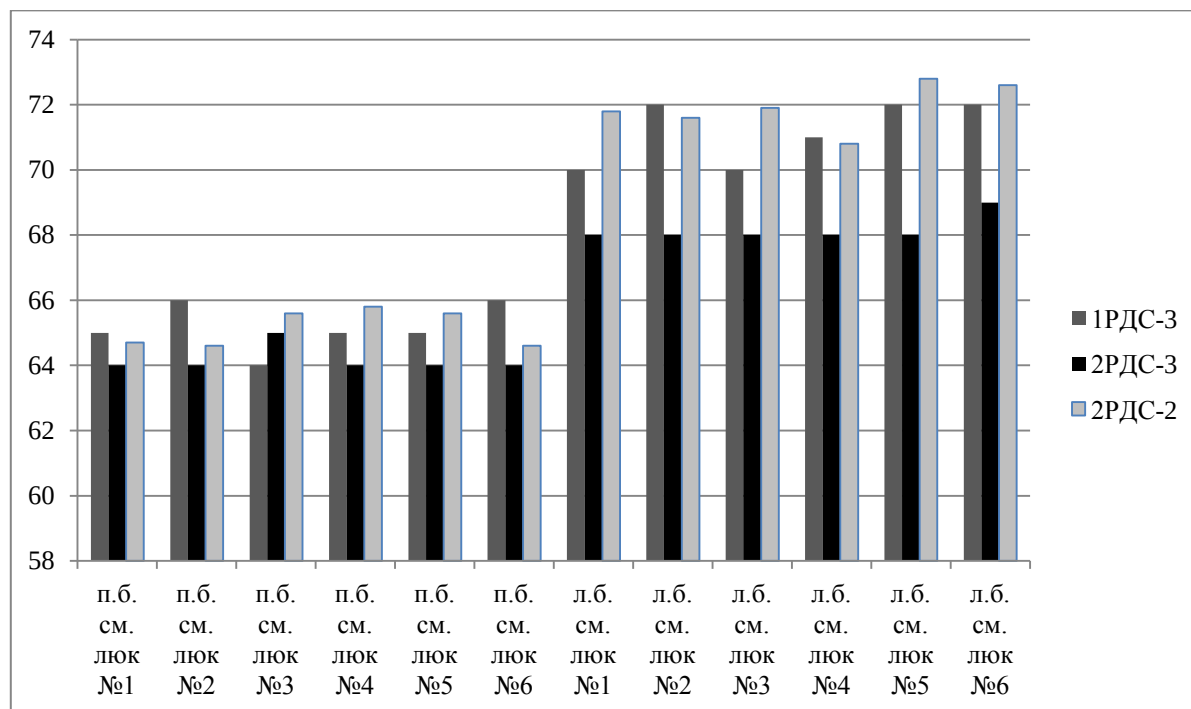


Рисунок 3 – Распределение температур смотровых лючков [Temperature distribution of inspection doors]

Большая температура на левом борте объясняется направлением вращения коленчатого вала.

4. Анализ работы системы смазки

Для оценки работы подшипников коленчатого вала в соответствии с проектом методики было проведено термографирование смотровых лючков дизелей 1РДЭС-3, 2РДЭС-3, 2РДЭС-2.

Температуры масляных насосов $T_{\text{м.насос}}$, зарегистрированные при испытании КАС ТВК приведены в таблице 3. Как показывают данные таблицы 3, температура масляных насосов соответствует норме.

Таблица 3 – Температуры масляных насосов дизелей 12zv40/48 [Oil pump temperatures for 12zv40/48 diesel engines]

№	Объект	Дата	$T_{\text{м.насос}}, ^\circ\text{C}$
1	1РДЭС-3 (РоАЭС)	17.08.2022	71
2	2РДЭС-3 (РоАЭС)	18.08.2022	69
3	2РДЭС-2 (РоАЭС)	15.09.2022	72

Контроль работы системы смазки 1РДЭС-3, 2РДЭС-2 и 2РДЭС-3 осуществлялся штатной системой. Усредненные параметры системы смазки, – температура масла на входе в дизель $T_{\text{мд1}}$, температура масла на выходе из дизеля $T_{\text{мд2}}$, давление масла на

входе в дизель Рмд1, давление масла в дизеле Рмд2, уровень масла в циркуляционной цистерне Лц, – при близком значении мощности дизеля представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры системы смазки дизелей 12zv40/48 [Параметры системы смазки дизелей 12zv40/48]

Объект	P, кВт	Q, кВт	T _{мд1} , °C	T _{мд2} , °C	P _{мд1} , кгс/см ²	P _{мд2} , кгс/см ²	Лц, см
1РДЭС-3	2547	1770	53,7	57,8	5,1	5,1	1526,6
2РДЭС-2	2784	2098	53,9	52,1	6,0	6,1	1460,1
2РДЭС-3	2722	2153	52,9	57,3	6,1	6,1	1530,0

Как видно из данных таблицы, температура масла на входе в дизель не выше предельно допустимой (60°C), разность температур масла на входе и выходе из дизеля также ниже предельно допустимых значений (12-14°C);

Значения параметров, полученные при анализе показателей штатной системы контроля, зарегистрированных при установившемся значении мощности, будут использованы при последующем диагностировании для установления тенденций изменения данных параметров.

5. Анализ работы системы охлаждения

Для оценки работы системы охлаждения в соответствии с проектом методики было проведено термографирование насосов внутреннего и промежуточного контуров дизелей 1РДЭС-3, 2РДЭС-3, 2РДЭС-2.

Температуры масляных насосов, зарегистрированные при испытании КАС ТВК, приведены в таблице 5. Для сравнения приведены температуры насосов внутреннего и промежуточного контуров дизелей 12zv40/48, зарегистрированные при предыдущем термографировании, а также результаты термографирования дизелей 12zv40/48 на Нововоронежской и Смоленской станциях.

Таблица 5 – Температуры насосов внутреннего и промежуточного контуров дизелей 12zv40/48 [Температуры насосов внутреннего и промежуточного контуров дизелей 12zv40/48]

№	Объект	Дата	T _{насос в.к.} , °C	T _{насос п.к.} , °C
1	1РДЭС-3 (РоАЭС)	17.08.2022	59	41
2	2РДЭС-3 (РоАЭС)	18.08.2022	53	36
3	2РДЭС-2 (РоАЭС)	15.09.2022	67	38
4	2РДЭС-2 (РоАЭС)	20.05.2015	64	42
5	2РДЭС-3 (РоАЭС)	15.06.2015	60	43
4	5ДГ-2 (НВ АЭС)	14.12.2020	54	42
5	1ДГ-3 (САЭС)	03.06.2019	58	

Как показывают данные таблицы 5, температура насосов внутреннего и промежуточного контуров 1РДЭС-3, 2РДЭС-3, 2РДЭС-2 в 2022 не превышает предельно допустимого значения.

Контроль работы системы охлаждения 1РДЭС-3, 2РДЭС-2 и 2РДЭС-3 осуществлялся штатной системой. Усредненные параметры системы охлаждения, – температура воды внутреннего контура охлаждения на выходе из дизеля Твкд., уровень воды в расширительном баке внутреннего контура охлаждения Лрб, температура воды внутреннего контура охлаждения на входе охладителя воды Твко, температура воды промежуточного контура на входе охладителя воды внутреннего контура Тпк1, температура воды промежуточного контура на выходе охладителя воды внутреннего контура Тпк2, – при близком значении мощности представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Параметры системы охлаждения дизелей 12zv40/48 [Cooling system parameters for 12zv40/48 diesel engines]

Объект	P, кВт	Q, кВт	Твк.д., °C	Lpб, см	Твк.о, °C	Тпк1, °C	Тпк2, °C
1РДЭС-3	2547	1770	59,24	596,64	53,23	74,50	36,50
2РДЭС-2	2784	2098	57,91	685,12	46,79	42,72	38,00
2РДЭС-3	2722	2153	55,22	593,18	45,55	46,06	33,81

Значения параметров, полученные при анализе показателей штатной системы контроля, зарегистрированных при установившемся значении мощности, будут использованы при последующем диагностировании для установления тенденций изменения данных параметров.

Таким образом, совместный анализ результатов, полученных штатной и разрабатываемой системой, подтверждает информативность термографических параметров и качество работы измерительных каналов штатных систем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Белов, О.А. Методология оценки технического состояния электрооборудования при развитии параметрических отказов / О.А. Белов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2015. – № 3. – С. 96-102.
2. Семенцов, С.Г. Тепловизионные методы оценки влияния температурных режимов на надежность электронной аппаратуры / С.Г. Семенцов, В.Н. Гріднев, Н.А. Сергеева // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. – 2016. – № 1(106). – С. 3-14.
3. Гевлич, С.О. Оценка технического состояния оборудования методом тепловизионного контроля / С.О. Гевлич, Д.С. Гевлич, Т.Г. Бабяк, К.А. Васильев, С.С. Коновалов, Н.В. Макарова, М.В. Мирзонов // Технические науки – от теории к практике. – 2015. – № 9(45). – С. 86-94.
4. Абидова, Е.А. Разработка автоматизированной системы хранения и обработки результатов тепловизионного контроля оборудования АЭС / Е.А. Абидова, Е.В. Воробьев, М.В. Калашников, Д.А. Прыткова // Наука и инновации в современном мире: Сборник научных статей. Ч. IX / Научный ред. канд.филол.н. Е.Н. Муратова. – Москва: Издательство «Перо», – 2021. – С. 62-65.
5. Енюшин, В. Н. О влиянии излучательной способности поверхности исследуемого объекта на точность измерения температур при тепловизионном обследовании / В.Н. Енюшин, Д.В. Крайнов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 1(23). – С. 99-103.
6. Ещенко, Д.В. Практическое применение методов тепловизионного анализа и контроля / Д.В. Ещенко, А.Т. Никитин, О.А. Белов // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2020. – № 54. – С. 6-19. – DOI 10.17217/2079-0333-2020-54-6-19.
7. Yuanbin W., Yang Y., Jieying R. Research on thermal state diagnosis of substation equipment based on infrared image // Advances in Mechanical engineering, 2019 №4(11). P. 1-14.
8. Цаплин, А.Е. Совершенствование контроля узлов механической части электрического подвижного состава применением интеллектуальной системы тепловизионного контроля / А.Е. Цаплин, В.А. Васильев, С.А. Фомин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2019. – Т. 16, № 2. – С. 268-274. – DOI 10.20295/1815-588X-2019-2-268-274.
9. Teju V., Bhavana D. An efficient object detection using OFSA for thermal imaging // International Journal of Electrical Engineering & Education, 2020 №1(22). P. 1-22
10. Концепция создания комплексной автоматизированной системы тепловизионного контроля / Д. В. Швец, Е. А. Абидова, М. В. Калашников [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 1(42). – С. 60-66. – DOI 10.26583/gns-2022-01-06.
11. Виброакустический мониторинг и тепловизионный контроль при диагностировании дизеля 12ZV40/48 / Е.А. Абидова, В.И. Соловьев, О.Ю. Пугачева, Р.И. Ремизов // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 2(19). – С. 70-76.
12. Абидова, Е.А. Результаты диагностирования дизеля 15Д-100 посредством виброакустического мониторинга и тепловизионного контроля / Е.А. Абидова, О.Ю. Пугачева, В.И. Соловьев // Безопасность ядерной энергетики [Электронный ресурс] : тез. докл. XI Междунар. науч.-

практ. конф., 27-29 мая 2015 г. / ВИТИ НИЯУ МИФИ [и др.]. – Волгодонск: [Б. и.], 2015. – 1 электрон. опт. диск (CD).

13. Абидова, Е.А. Диагностирование дизель-генераторного оборудования АЭС по результатам виброконтроля и теплотерии / Е.А. Абидова, О.Ю. Пугачева, В.И. Соловьев [и др.] // Безопасность ядерной энергетики [Электронный ресурс] : тез. докл. XII Междунар. науч.-практ. конф., 1-3 июня 2016 г. / ВИТИ НИЯУ МИФИ [и др.]. – Волгодонск: [Б. и.], 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD).

REFERENCES

- [1] Belov O.A. Metodologiya ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya pri razvitiy parametricheskikh otkazov [Methodology of Evaluation the Technical Condition of Electrical Equipment in the Development of Parametric Failures], Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya [Bulletin of Astrakhan State University. Series: Marine Engineering and Technology], 2015, No. 3, pp. 96-102 (in Russian).
- [2] Sementsov S.G., Gridnev V.N., Sergeeva N.A. Teplovizionnye metody ocenki vliyaniya temperaturnykh rezhimov na nadezhnost' elektronnoy apparatury [Infrared Thermography Methods of Assessing Temperature Effect on Reliability of Electronic Equipment], Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya Priborostroenie [Bulletin of Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrumentation series], 2016, No. 1, pp. 3-14. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-1-3-14 (in Russian).
- [3] Gevlich S.O., Gevlich D.S., Babyak T.G., Vasil'ev K.A., Konovalov S.S., Makarova N.V., Mirzonov M.V. Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya metodom teplovizionnogo kontrolya [Assessment of Technical Condition of Equipment by Thermal Imaging Control], Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike [Technical sciences - from Theory to Practice], 2015, No. 9(45), pp. 86-89 (in Russian).
- [4] Abidova E.A., Vorobyev E.V., Kalashnikov M.V., Prytkova D.A. Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy hraneniya i obrabotki rezul'tatov teplovizionnogo kontrolya oborudovaniya AES [Development of Automated System for Storing and Processing the Results of Thermal Imaging Control of NPP Equipment], Nauka i innovatsii v sovremennom mire: Sbornik nauchnykh statej. CH. IX [Science and Innovation in the Modern World: Collection of scientific articles. Part IX]. Moscow: Pero Publishing House, 2021, pp. 62-65 (in Russian).
- [5] Enyushin V.N., Krajnov D.V. O vliyani izluchatel'noj sposobnosti poverhnosti issleduemogo ob'ekta na tochnost' izmereniya temperatur pri teplovizionnom obsledovanii [Influence of the Emissivity of the Surface of Object under Study on the Accuracy of Temperature Measurement during Thermal Imaging Examination], Izvestiya KGASU [News of the KSUAE], 2013, No. 1(23), pp. 99-103 (in Russian).
- [6] Eshchenko D.V., Nikitin A.T., Belov O.A. Prakticheskoe primeneniye metodov teplovizionnogo analiza i kontrolya [Practical Application of Thermal Imaging Analysis and Control Methods]. Vestnik KSTU [Bulletin of KSTU], 2020, No. 54, pp. 6-19 (in Russian).
- [7] Yuanbin W., Yang Y., Jieying R. Research on Thermal State Diagnosis of Substation Equipment Based on Infrared Image // Advances in Mechanical engineering, 2019, No. 4(11), pp. 1-14 (in English).
- [8] Caplin A.E., Vasil'ev V.A., Fomin S.A. Sovershenstvovanie kontrolya uzlov mekhanicheskoy chasti elektricheskogo podvizhnogo sostava primeneniem intellektual'noj sistemy teplovizionnogo kontrolya [Improving Control of Components of Mechanical Part of Electric Rolling Stock by Using an Intelligent Thermal Imaging Control System], Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshchenij [News of the St. Petersburg University of Railway Communications], 2019, No. 2(16), pp. 268-274 (in Russian).
- [9] Teju V., Bhavana D. An Efficient Object Detection Using OFSA for Thermal Imaging // International Journal of Electrical Engineering & Education, 2020, No. 1(22), pp. 1-22 (in English).
- [10] Shvets D.V., Abidova E.A., Kalashnikov M.V., Cooks P.V. [et al] Kontseptsiya sozdaniya kompleksnoy avtomatizirovannoy sistemy teplovizionnogo kontrolya [The concept of creating an integrated automated system for thermal imaging control], Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety], 2022, No. 1(42), p. 60-66 (in Russian).
- [11] Abidova E.A., Solovev V.I., Pugacheva O.Yu., Remizov R.I. Vibroakusticheskij monitoring i teplovizionnyj kontrol' pri diagnostirovani dizelya 12ZV40/48 [Vibroacoustic Monitoring and Thermal Imaging Control in the Diagnosis of Diesel 12ZV40/48], Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety], 2016, No. 2(19), pp. 70-76 (in Russian).
- [12] Abidova E.A., Pugacheva O.Yu., Solovyov V.I. Rezul'taty diagnostirovaniya dizelya 15D-100 posredstvom vibroakusticheskogo monitoringa i teplovizionnogo kontrolya [The Results of Diagnosing a Diesel Engine 15D-100 by Means of Vibroacoustic Monitoring and Thermal Imaging]

Control] Bezopasnost' yadernoj energetiki [Elektronnyj resurs] : tez. dokl. HI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., 27-29 maya 2015 g [Safety of Nuclear Energy [Electronic resource]: abstract report of XI International Scientific Practical conference, May 27-29, 2015 / VETI NRNU MEPhI Volgodonsk, 2015, 1 electron. opt. disc (CD) (in Russian).

- [13] Abidova E.A., Pugacheva O.Yu., Solovyov V.I. [et al] Diagnostirovanie dizel'-generatornogo oborudovaniya AES po rezul'tatam vibrokontrolya i teplometrii report [Diagnostics of NPP Diesel Generator Equipment Based on the Results of Vibration Monitoring and Thermal Measurements] Bezopasnost' yadernoj energetiki [Elektronnyj resurs]: tez. dokl. HI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., 1-3 iyunya 2016g [Safety of Nuclear Energy [Electronic resource]: abstract report of XII International Scientific Practical conference, June 1-3, 2016 / VETI NRNU MEPhI Volgodonsk, 2016, 1 electron. opt. disc (CD) (in Russian).

Methodology of Analysis of Thermal Vision Parameters of NPP Standby Diesel Together with Standard Instrument Readings

Elena A. Abidova¹, Prokhor V. Povarov², Vladimir M. Popov³, Daria A. Prytkova⁴, Olga Yu. Pugacheva⁵

¹²⁴⁵Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360

³«Rostov nuclear power plant» branch of Rosenergoatom Concern JSC

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

²nii_energomash@mail.ru

³info@vdpnp.rosenergoatom.ru

⁴nii_energomash@mail.ru

⁵OYPugacheva@mephi.ru

Received by the editorial office on 12/16/2022

After revision on 02/17/2023

Accepted for publication 02/21/2023

Abstract. Analytical studies of the results of thermal imaging control using IAS TIK together with the corresponding values of the temperature control results obtained in the standard DGS condition monitoring system were carried out within the framework of R&D for the development of an integrated automated system for thermal imaging control (IAS TIK). Approbation of IAS TIK in NPP conditions was carried out by thermography of standby diesel generator sets of NPP type 12zv40/48+S2445-12. At the same time, the parameters of the diesel engine and the generator were measured using the standard control system. The methodology is proposed that provides an analysis of the uniformity of the operation of diesel cylinders, the condition of the crankshaft bearings, the condition and quality of the generated electricity of the generator, as well as the analysis of the operation of lubrication and cooling systems. The practical application of the technique demonstrates the correspondence between the temperatures measured by the standard system and the IAS TIK. A joint analysis of the results obtained by the standard and developed systems provides an increase in the depth of the diagnostic examination and confirms the information content of the thermographic parameters and the quality of the measurement channels of the standard systems. The parameter values obtained from the analysis of the indicators of the standard control system, recorded at a steady power value, will be used in subsequent diagnostics to establish trends in these parameters.

Keywords: thermal imaging control, uniformity of diesel operation, diagnostics of crankshaft bearings, power quality control, diagnostics of lubrication and cooling systems.

For citation: Abidova E.A., Povarov P.V., Popov V.M., Prytkova D.A., Pugacheva O.Yu. Methodology of Analysis of Thermal Vision Parameters of NPP Standby Diesel Together with Standard Instrument Readings // Global Nuclear Safety. 2023. No. 1(46). P. 67-78 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2023-01-06>.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.5 : 519.876.5 : 004.43
DOI 10.26583/gns-2023-01-07
EDN QXXMFL

ВЫБОР АЛГОРИТМА ВЫГОРАНИЯ В OPENMC НА ПРИМЕРЕ
РАСЧЕТНОГО БЕНЧМАРКА СБОРКИ LEU И МОХ-ТОПЛИВА
ВВЭР-1000

© 2023 Хамза Ахмад Танаш¹, Денис Алексеевич Соловьёв²,
Вячеслав Геннадьевич Зимин³, Алексей Леонидович Лобарев⁴,
Денис Алексеевич Плотников⁵, Николай Васильевич Щукин⁶

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

¹tanash_hamza@yahoo.com, <http://orcid.org/0000-0002-7831-8516>

²vulture@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0507-0839>

³vgzimin@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0334-3741>

⁴lobarev.alexey@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-5258-3357>

⁵pda1995@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-9387-170x>

⁶pikenv@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-4228-7228>

Аннотация. OpenMC – это современный код моделирования процессов переноса нейтронов методом Монте-Карло, который использует в качестве программного интерфейса (API) язык программирования Python. OpenMC поддерживает восемь алгоритмов моделирования выгорания. В этом исследовании представлены результаты выбора метода интегрирования при моделировании выгорания ТВС с выгорающими поглотителями для реакторов ВВЭР-1000. Результаты моделирования выгорания, полученные по OpenMC, сравнивались с результатами, представленными в бенчмарк OECD. Для моделирования выгорания в коде OpenMC можно использовать 8 различных численных интеграторов: PI, CE/CM, LE/QI, CE/LI, CF4, EPC-RK4, SI-CE/LI, SI-LE/QI. Результаты тестов показали, что интеграторам SI-CE/LI, SI-LE/QI требуется значительно больше времени для расчета одного шага по выгоранию, чем остальным при одинаковой точности, поэтому они были исключены из дальнейшего рассмотрения. Интегратор PI показал низкую точность интегрирования при одинаковых шагах по выгоранию с другими интеграторами. Однако PI обладает высоким быстродействием, в сравнении с другими интеграторами, и по мере уменьшения шага интегрирования обладает сходимостью к одному решению, которое может быть выбрано как реперное для оценки качества других интеграторов. На основе результатов, полученных с использованием интегратора PI с мелким шагом, было принято решение использовать для дальнейшей работы интегратор CE/LI. Результаты, полученные с помощью CE/LI, были сравнены с результатами, полученными в бенчмарке VVER-1000 LEU and MOX по кодам: MCU, TVS-M, WIMS8A, HELIOS, MULTICELL, и показали хорошее совпадение. Таким образом можно сделать вывод применимости интегратора CE/LI в составе OpenMC для моделирования выгорания ТВС, содержащих выгорающие поглотители. При проведении работ были использованы ресурсы высокопроизводительного вычислительного центра НИЯУ МИФИ

Ключевые слова: OpenMC, выгорание, методы интегрирования, бенчмарк OECD, реакторов ВВЭР-1000, метод переноса нейтронов, предиктор интегратор (PI), CE/LI Интегратор, ENDF/B-VII.1, коэффициент размножений нейтронов.

Для цитирования: Танаш Х.А., Соловьёв Д.А., Зимин В.Г., Лобарев А.Л., Плотников Д.А., Щукин Н.В. Выбор алгоритма выгорания в OpenMC на примере расчетного бенчмарка сборки LEU и МОХ-топлива ВВЭР-1000 // Глобальная ядерная безопасность. – 2023. – № 1(46). – С. 79-91 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2023-01-07>.

Поступила в редакцию 15.12.2022

После доработки 16.02.2023

Принята к публикации 21.02.2023

Введение

OpenMC представляет собой код моделирования переноса нейтронов методом Монте-Карло с программным интерфейсом на языке программирования *Python* [1]. Одной из интересных возможностей *OpenMC* является возможность использования различных алгоритмов численного интегрирования (интеграторов) при решении задачи выгорания ядерного топлива. В качестве интеграторов в *OpenMC* могут быть использованы: предиктор интегратор (*PI*), интегратор с постоянной экстраполяцией и постоянной средней точкой (*CE/CM*), интегратор с линейной экстраполяцией и квадратичной интерполяцией (*LE/QI*), интегратор с постоянной экстраполяцией и линейной интерполяцией (*CE/LI*), интегратор четвертого порядка без коммутатора (*CF4*), интегратор с расширенным предиктор-корректором с методом Рунге-Кутты четвертого порядка (*EPC-RK4*), стохастический неявный *CE/LI* (*SI-CE/LI*) и стохастический неявный *LE/QI* (*SI-LE/QI*) интеграторы [2, 3].

Возможности по моделированию выгорания кодом *OpenMC* были представлены авторами в работе [4]. В ней было выполнено моделирование ячейки реактора с водой под давлением (*PWR*), а также моделирование ТВС реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (*SFR*). Дополнительно для проверки качества моделирования коэффициента размножения нейтронов и концентраций нуклидов в процессе выгорания топлива было произведено сравнение с результатами, полученными по аналогичному коду *Serpent2*, для теста *VERA* [5]. Таким образом была показана возможность корректного моделирования выгорания топлива с использованием кода *OpenMC*.

Однако используемые в *OpenMC* алгоритмы численного интегрирования при выгорании имеют различную точность и быстродействие. Какой из методов следует использовать при моделировании выгорания ТВС [6] для реакторов ВВЭР-1000? Проведем численные тесты и на основе результатов этих тестов сделаем выбор подходящего метода интегрирования.

Для начала приведем краткое описание используемых в *OpenMC* алгоритмов численного интегрирования при моделировании выгорания.

1 Алгоритмы численного интегрирования при моделировании выгорания

Выгорание топливных материалов в течение топливной кампании реактора происходит из-за протекающих ядерных реакций и спонтанного радиоактивного распада. Все это изменяет материальный состав топлива. Уравнения Бейтмана описывают эти превращения материалов во времени. Простейшая форма уравнения Бейтмана может быть записана следующим образом (1):

$$\frac{dx(t)}{dt} = F(x(t), t)x(t), \quad (1)$$

где $F(x(t), t)$ – матрица коэффициентов выгорания в момент времени t ;

$x(t)$ – вектор с концентрациями нуклидов.

Для решения уравнения (1) в *OpenMC* представлено 8 различных численных интеграторов: *PI*, *CE/CM*, *LE/QI*, *CE/LI*, *CF4*, *EPC-RK4*, *SI-CE/LI*, *SI-LE/QI*. Рассмотрим их подробнее [7,8].

1.1 *PI* Предиктор Интегратор

Предиктор Интегратор – это простейший численный метод, используемый для решения уравнения Бейтмана. Этот интегратор работает с $F(x(t), t)$ как с постоянной

матрицей. При этом предположении решение стало более простым, как показано в уравнении (2), но в то же время снизилась точность предсказания концентрации нуклидов во времени:

$$x(t) = X(0)e^{Ft}. \quad (2)$$

Для оценки $F(x(t), t)$ используется кусочно-постоянная аппроксимация начале временного шага. Интегрирование может быть выполнено, как показано в уравнении (3):

$$x_{i+1} = x_i e^{F_i h}, \quad (3)$$

где h – временной интервал шага выгорания;
 i – номер шага.

1.2 CE/CM Интегратор

CE/CM является методом интегрирования, используемым по умолчанию в коде MCNP6 [9, 10]. Этот метод интегрирования означает постоянную экстраполяцию, а также постоянную среднюю точку на шаге предиктора и шаге корректора. В алгоритме CE/CM предиктор выгорает до средней точки, после чего оценивается матрица распада. Только эта новая матрица используется до конца временного шага корректором. Уравнения (4)-(5) описывают решение для этого метода интегрирования, где y – вектор концентраций нуклидов, оцененных в середине временного шага:

$$y = e^{F(x_i, t_i) \frac{h}{2}}, \quad (4)$$

$$x_{i+1} = x_i e^{F(y, t + \frac{h}{2}) h}. \quad (5)$$

1.3 CE/LI Интегратор

CE/LI обозначает постоянную экстраполяцию на шаге предиктора и линейную интерполяцию на шаге корректора. Этот интегратор используется в коде *Serpent2* в качестве метода интегрирования, используемого по умолчанию [11]. При использовании этого метода интегрирования процесс выгорания занимает больше времени, чем при использовании предиктора интегратора, потому что вычисление предиктора производится до конца временного шага, и после этого в конце временного шага вычисляется обновленная матрица распада. Уравнения (6)-(7) описывают решение для этого метода интегрирования. Шаг линейного корректора усредняет матрицу распада в начале и конце временного шага, как показано в уравнении (7), что повышает эффективность предсказания концентраций нуклидов:

$$y = e^{F(x_i, t_i) h}, \quad (6)$$

$$x_{i+1} = x_i e^{\left[\frac{1}{2} F(y, t_i + h) + \frac{1}{2} F(x_i, t_i) \right] h}, \quad (7)$$

где y – концентрация нуклидов, рассчитанная в конце временного шага интегратором предиктора. Матрица $F(x(t), t)$ как в начале, так и в конце временного шага усредняется при интегрировании корректора.

1.4 CF4 Интегратор

CF4 означает без коммутаторный метод интегрирования четвертого порядка. Этот метод интегрирования имеет высокую точность четвертого порядка и требует двух

экспоненциальных матриц для расчета. Уравнения (8)-(15) показывают, как работает процедура *CF4* для расчета концентраций нуклидов:

$$F_1 = hF(x_0), \quad (8)$$

$$x_1 = x_0 e^{\left(\frac{1}{2}F_1\right)}, \quad (9)$$

$$F_2 = hF(x_1), \quad (10)$$

$$x_2 = x_0 e^{\left(\frac{1}{2}F_2\right)} \quad (11)$$

$$F_3 = hF(x_3), \quad (12)$$

$$x_3 = x_1 e^{\left(F_3 - \frac{1}{2}F_1\right)}, \quad (13)$$

$$x_4 = hF(x_3), \quad (14)$$

$$x_4 = x_0 e^{\left(\frac{1}{4}F_1 + \frac{1}{6}F_2 + \frac{1}{6}F_3 - \frac{1}{12}F_4\right)} * e^{\left(\frac{-1}{12}F_1 + \frac{1}{6}F_2 + \frac{1}{6}F_3 + \frac{1}{4}F_4\right)}. \quad (15)$$

1.5 EPC-RK4 Интегратор

EPC-RK4 – этот метод интегрирования представляет собой комбинированный метод, который включает предиктор-корректор с методом Рунге-Кутты [5]. Этот интегратор имеет высокую точность, хотя он относится к методам второго порядка. Математическое выражение для этого метода может быть выражено в следующих уравнениях (16)-(22) для получения концентраций нуклидов и матричной экспоненты:

$$x_1 = x_0 e^{\left(\frac{1}{2}F_1\right)}, \quad (16)$$

$$F_2 = hF(x_1), \quad (17)$$

$$x_2 = x_0 e^{\left(\frac{1}{2}F_2\right)}, \quad (18)$$

$$F_3 = hF(x_2), \quad (19)$$

$$x_3 = x_0 e^{\left(\frac{1}{2}F_3\right)}, \quad (20)$$

$$F_4 = hF(x_3), \quad (21)$$

$$x_4 = x_0 e^{\left(\frac{1}{6}F_1 + \frac{1}{3}F_2 + \frac{1}{3}F_3 + \frac{1}{6}F_4\right)}. \quad (22)$$

1.6 LE/QI Интегратор

LE/QI – это сокращение от линейной экстраполяции на шаге предиктора и квадратичной интерполяции на шаге корректора [4]. Этот метод интегрирования относится к семейству методов второго порядка по экстраполяции и третьего порядка по точности интерполяции. Интегратор *LE/QI* использует концентрации нуклидов с предыдущих временных шагов, но это требует больших затрат по памяти для хранения данных. Следующие уравнения (23)-(24) объясняют работу этого метода интегрирования математически:

$$y = e^{\frac{-h_j}{2h_{j-1}}F(x_{j-1,j-1}) + \left(1 + \frac{h_j}{2h_{j-1}}\right)F(x_{j,j})}, \quad (23)$$

$$x_{j+1} = x_j e^{\left[\frac{-h_j^2}{6h_{j-1}(h_{j-1}+h_j)}F(x_{j-1,j-1}) + \left(\frac{1}{2} + \frac{h_j}{6h_{j-1}}\right)F(x_{j,j}) + \left(\frac{1}{2} - \frac{h_j^2}{6h_{j-1}(h_{j-1}+h_j)}\right)F(x_{j+1,j+1})\right]}. \quad (24)$$

1.7 Стохастический неявный метод

В стохастическом неявном методе Эйлера (*SI-E*) для того, чтобы повысить точность и стабильность работы метода, шаг интегрирования предиктора преобразуется

в неявную форму. Метод стохастического градиентного спуска используется для определения концентраций нуклидов и скоростей реакций на этапе предсказания. Основная идея метода может быть выражена математически следующим образом, уравнения (25)-(29):

$$x_{i+1}^0 = x_i e^{F(x_i, i)h} \quad (25)$$

$$F(i+1)^n = F(i+1, x_{i+1}^n) \quad (26)$$

$$\bar{F}(i+1)^n = \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n F(i+1)^j \quad (27)$$

$$x_{i+1}^n = x_i e^{\bar{F}(i+1, x_{i+1}^{n-1})} \quad (28)$$

$$x_{i+1} = x_{i+1}^m, \quad (29)$$

где n – текущий подшаг;

m – количество подшагов.

В коде *OpenMC* реализовано два интегратора на основе стохастических неявных методов: *SI-CE/LI* и *SI-CE/QI*, которые расширяют стохастический неявный метод Эйлера на существующие интеграторы *CE/LI* и *LE/QI* соответственно. Оба обеспечивают повышенную стабильность при решении уравнений выгорания очень больших систем, в которых могут наблюдаться осцилляции ксенона.

1.8 Обобщенные характеристики методов интегрирования

Обобщенные характеристики различных интеграторов высокого порядка, реализованных в *OpenMC*, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Обзор численных интеграторов высокого порядка [Overview of high order numerical integrators]

Алгоритмы	Время расчета на один шаг	Тип предиктора	Тип корректора	Точность
<i>PI</i>	1	Постоянный	Отсутствует	$O(1)$
<i>CE/LI</i>	2	Постоянный	Линейный	$O(2)$
<i>CE/CM</i>	2	Постоянный	Постоянный	$O(2)$
<i>LE/QI</i>	3	Линейный	Квадратичный	$O(2)$
<i>EPC-RK4</i>	4	Подшаг	Подшаг	$>O(2)$
<i>CF4</i>	4	Подшаг	Подшаг	$>O(2)$
<i>SI-CE/LI</i>	>50	Постоянный	Линейный	$>O(2)$
<i>SI-LE/QI</i>	>50	Линейный	Квадратичный	$>O(2)$

Моделирование выгорания проводилось с использованием только 6 интеграторов. Интеграторы *SI-CE/LI* и *SI-CE/QI* не использовались из-за большого времени расчета (используют более 50 расчетных шагов на один шаг по выгоранию при этом результаты так и не были получены). При этом как указывается в работе [12] точность расчета $K_{эфф}$ при моделировании выгорания с помощью *SI-CE/LI* и *SI-CE/Q* сопоставима с результатами, полученными с помощью других интеграторов.

2 Бенчмарк VVER-1000 LEU and MOX

2.1 Спецификация бенчмарка

Бенчмарк *VVER-1000 LEU and MOX* был впервые опубликован в 2002 г. [8]. Многие исследователи использовали его как эталон для проведения сравнительных проверок [12]. Этот бенчмарк состоит из двух разных ТВС ВВЭР-1000: однородной ТВС *LEU* с 12 твэлами из уран-гадолиния и профилированной ТВС *MOX* с 12 твэлами из уран-гадолиния. Шестиугольная конструкция ТВС *LEU* показана на рисунке 1. Эта ТВС состоит из 300 твэлов с обогащением по ^{235}U 3,7 вес.% и 12 уран-гадолиниевых твэлов с обогащением по ^{235}U 3,6 вес.% и 4 вес.% Gd_2O_3 , с одной центральной трубкой,

заполненной теплоносителем, и 18 направляющими трубками под стержни управления, которые также заполнены теплоносителем. В этом бенчмарке рассчитывались значения физических параметров ТВС в различных состояниях по пяти кодам: *MCU*, *TVS-M*, *WIMS8A*, *HELIOS* и *MULTICELL* с удельной мощностью для всей ТВС в 108 МВт/м^3 .

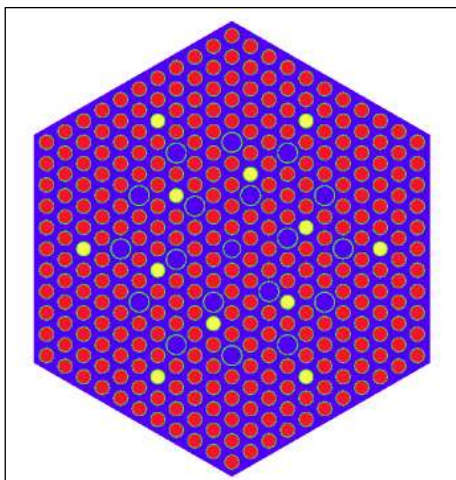


Рисунок 1 – Конструкция ТВС *LEU* [*LEU* Fuel assembly design]

2.2 Расчет *OpenMC*

В этом исследовании используется код *OpenMC* версии 0.13.0. Для проведения расчета ТВС используются следующие значения расчетных параметров: 300 000 историй нейтронов для каждого расчетного шага, 50 неактивных и 100 активных шагов расчета соответственно. Также используются версия файлов *ENDF/B-VII.1*, содержащих данные о нейтронных сечениях нуклидов. Для моделирования выгорания использовались цепочки распадов, содержащих информацию по всем нуклидам.

На первом этапе исследования проводилось сравнение результатов моделирования выгорания ТВС с использованием различных интеграторов, входящих в *OpenMC*, между собой и выбирался наилучший. Выбор интегратора производился на основе сравнения точности и скорости работы интеграторов. На втором этапе результаты, полученные с помощью выбранного интегратора, сравнивались с результатами, полученными в бенчмарке *VVER-1000 LEU and MOX*.

Расчеты выгорания выполнены для состояния *S1* этого бенчмарка при температуре топлива 1027 К и 575 К для температуры теплоносителя и оболочки ТВЭЛ. С равновесными концентрациями ^{135}Xe и ^{149}Sm . При плотности теплоносителя $0,7235 \text{ г/см}^3$ с концентрацией борной кислоты 0,6 г/кг. Объемное энерговыделение в ТВС устанавливалось равным 108 МВт/м^3 . Расчет выгорания производился до глубины выгорания 40 МВт*сут/кг тяжелых атомов (МВт*сут/кгТА). При этом выбирались следующие шаги по выгоранию: вначале было использовано 15 шагов по 1 МВт*сут/кгТА , а затем 5 шагов по 5 МВт*сут/кгТА . Для корректного моделирования выгорания ТВЭГ (ТВЭЛов с гадолинием) их топливные таблетки разбивались на 10 одинаковых по площади зон вдоль радиуса.

3 Результаты

3.1 Коэффициент размножений нейтронов

Изменение $K_{\text{эфф}}$ в зависимости от выгорания ТВС с *LEU* при использовании различных алгоритмов выгорания в *OpenMC* для состояния *S1* представлено на рисунке 2. При этом все алгоритмы численного интегрирования, используемые в *OpenMC* при моделировании выгорания ядерного топлива, дали приблизительно одинаковы тренды, за исключением интегратора *PI*, особенно в первые 10 МВт*сут/кгТА и в конце процесса выгорания, как показано на рисунке 2.

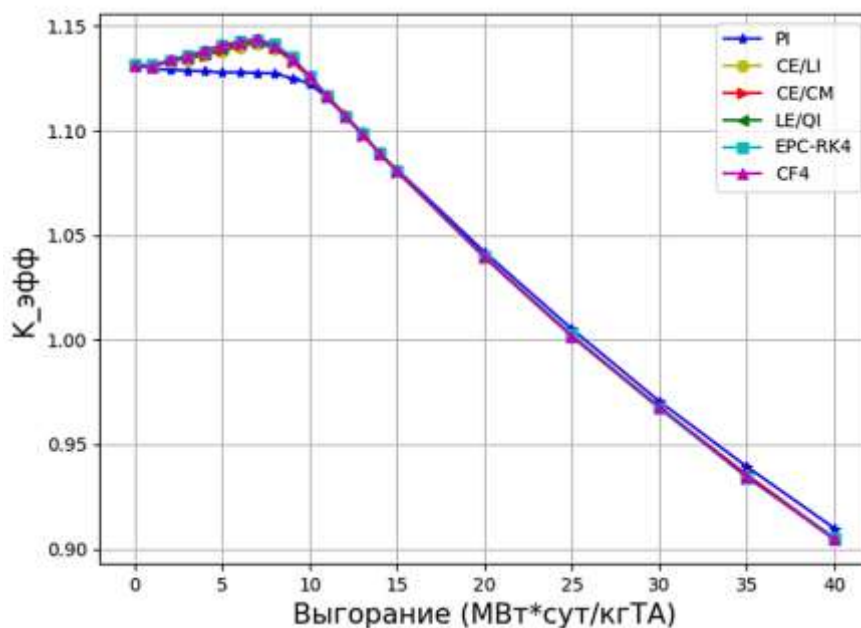


Рисунок 2 – Изменение $K_{\text{эфф}}$ в зависимости от выгорания ТВС LEU при использовании различных алгоритмов выгорания в *OpenMC* [Variation of K_{eff} as a function of LEU fuel burn-up when using different burn-up algorithms in *OpenMC*]

Снижение точности прогноза интегратора *PI* связано с большим интервалом шага выгорания, который равнялся 1 МВт*сут/кгТА для диапазона с 1 по 15 МВт*сут/кгТА и 5 МВт*сут/кгТА для диапазона выгорания с 15 по 40 МВт*сут/кгТА. Низкая точность в начале моделирования выгорания связана с неточностью в определении концентраций изотопов гадолиния ^{155}Gd и ^{157}Gd при таком большом шаге выгорания для *PI*[13]. Результат моделирования концентраций изотопов гадолиния представлен на рисунке 3. Отклонение при моделировании $K_{\text{эфф}}$ с использованием *PI* в конце процесса выгорания связано с ошибками в определении концентраций изотопов урана ^{235}U и ^{238}U , что показано на рисунке 4. Однако интегратор *PI* обладает высоким быстродействием в сравнении с другими интеграторами. Поэтому попробуем уменьшать шаг интегратора *PI* и посмотрим, даст ли нам это существенный выигрыш по скорости при достижении аналогичной точности других интеграторов.

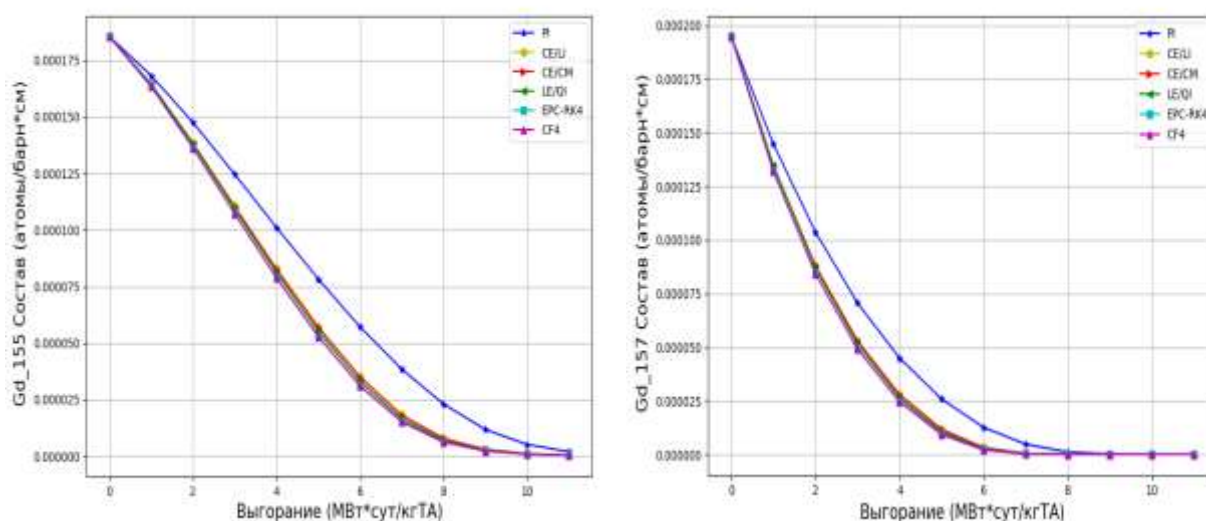


Рисунок 3 – Концентрации изотопов гадолиния ^{155}Gd и ^{157}Gd в начале моделирования процесса выгорания [Concentrations of gadolinium isotopes ^{155}Gd and ^{157}Gd at the start of the burn-up simulation]

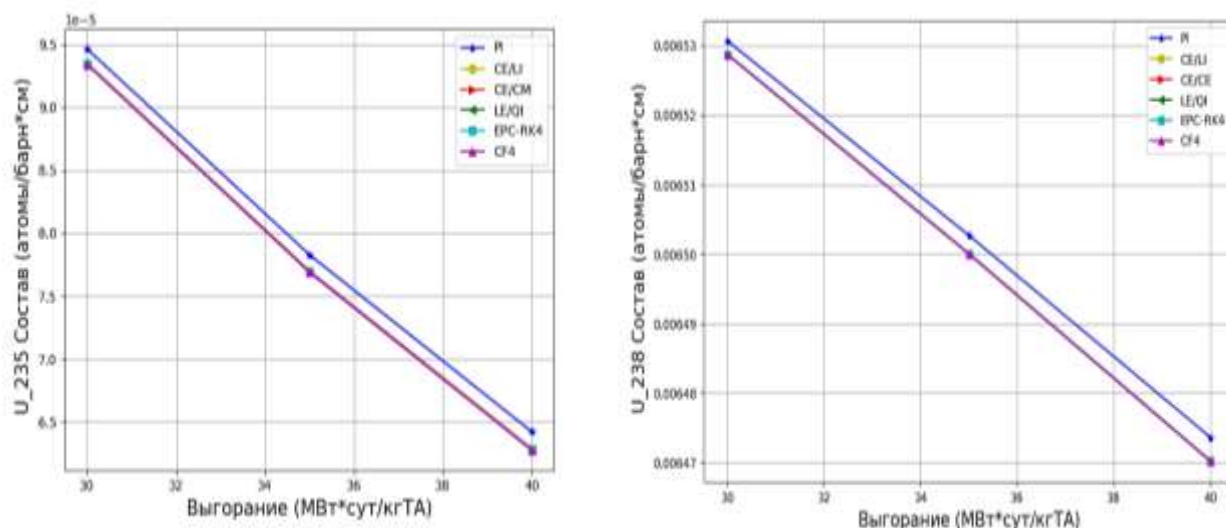


Рисунок 4 – Концентрации изотопов урана ^{235}U и ^{238}U в конце моделирования процесса выгорания [Uranium isotope concentrations of ^{235}U and ^{238}U at the end of the simulated burn-up process]

Для того чтобы понять какой шаг по выгоранию следует выбрать при моделировании выгорания с помощью интегратора PI , были выполнены расчеты выгорания с различными уменьшающимися интервалами по выгоранию. Для каждой новой серии расчетов шаг уменьшался в два раза. Поиск шага повторялся до тех пор, пока результаты расчета для текущей серии не перестали отличаться от результатов предыдущей серии. Результаты выбора шага представлены на рисунке 5. Видно, что по мере уменьшения шага, результаты, полученные с помощью интегратора PI , начинают приближаться к результатам, полученным с помощью других интеграторов (рис. 6 и 7).

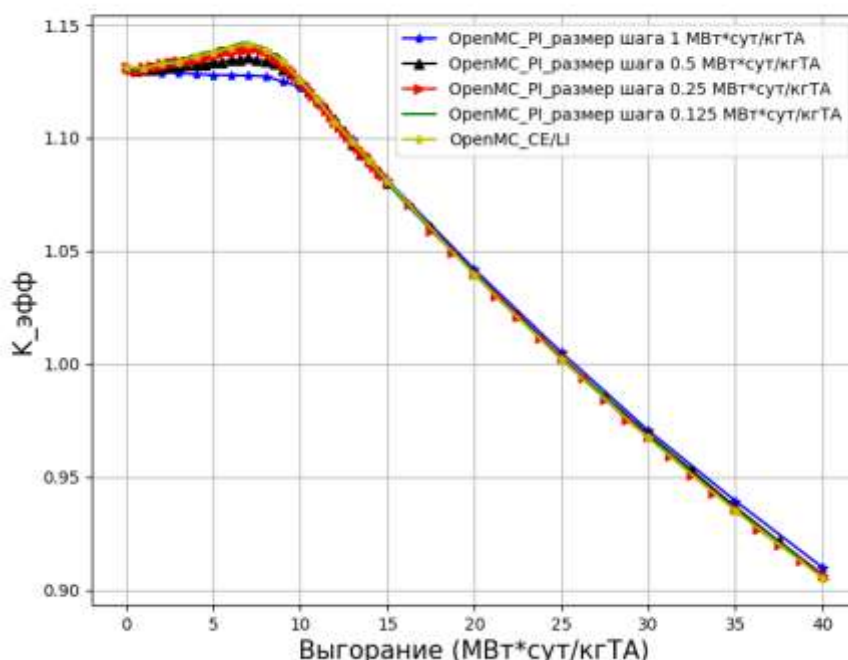


Рисунок 5 – Моделирование $K_{\text{эфф}}$ в зависимости от глубины выгорания ТВС LEU при различных величинах расчетного шага интегратора PI [Modelling of K_{eff} as a function of LEU fuel assembly burn-up depth at different values of the calculated integrator step PI]

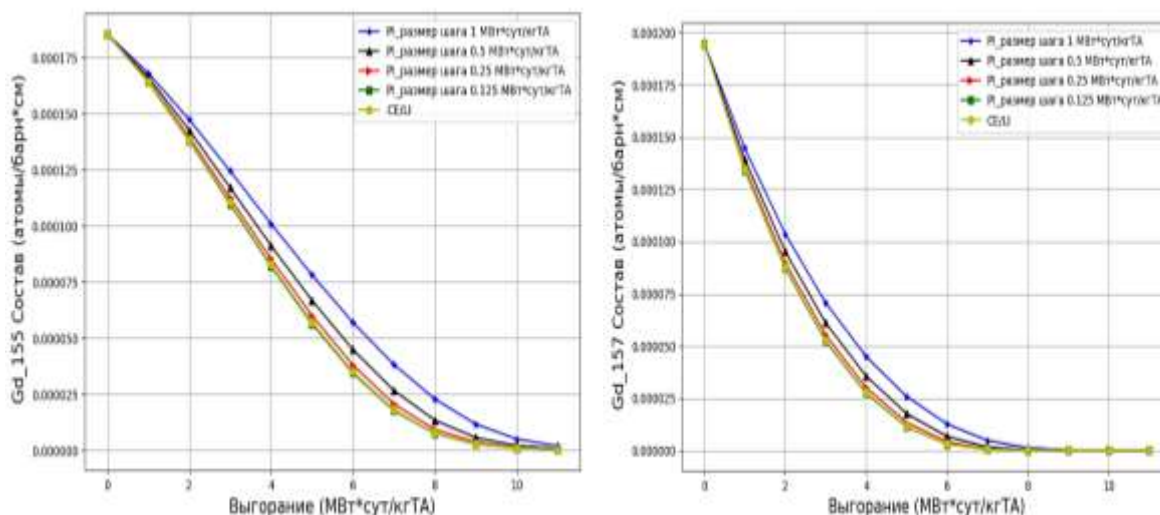


Рисунок 6 – Концентрации изотопов гадолиния ^{155}Gd и ^{157}Gd в начале моделирования процесса выгорания ТВС LEU при различных величинах расчетного шага интегратора PI [Concentrations of gadolinium isotopes ^{155}Gd and ^{157}Gd at the beginning of LEU fuel assembly burn-up simulation at different values of the calculated integrator step PI]

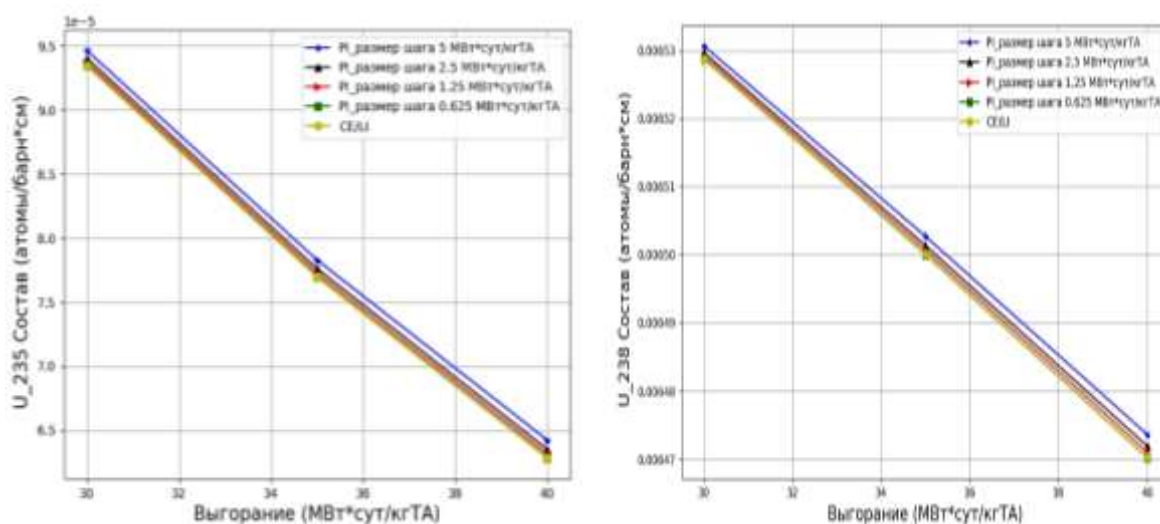


Рисунок 7 – Концентрации изотопов гадолиния ^{235}U и ^{238}U в конце моделирования процесса выгорания ТВС LEU при различных величинах расчетного шага интегратора PI [Concentrations of gadolinium isotopes ^{235}U and ^{238}U at the end of the LEU fuel assembly burn-up simulation at different values of the calculated integrator step PI]

По мере уменьшения шага интегрирования интегратор PI дает сходящиеся к верному решению результаты. Это позволяет произвести выбор наиболее эффективного по точности и скорости работы интегратора. Сравним между собой результаты, полученные с помощью других методов интегрирования, используемых в *OpenMC*, и результаты, полученные с помощью интегратора PI с малым шагом. Для сравнения выберем результаты моделирования $K_{\text{эфф}}$ для состояния $S1$ для ТВС LEU. Результаты сравнения представлены на рисунке 8. Относительное отличие результатов, полученных с помощью других интеграторов, от PI будем оценивать в pcm ($pcm = \left(\frac{K_{\text{эфф}i} - K_{\text{эфф}PI}}{K_{\text{эфф}PI}} \right) * 10^5$). Итак, *CF4* и *EPC-RK4* показали одинаковые значения отклонений от PI в диапазоне $[-150, 240] pcm$, в то время как отклонения от PI для *CE/LI* и *CE/CM* были меньше и находилась в диапазоне $[-100, 100] pcm$. Свой выбор остановим на интеграторе *CE/LI*, поскольку для него отклонение от результатов PI на начальном участке моделирования выгорания меньше (область выгорания гадолиния), чем для *CE/CM*.

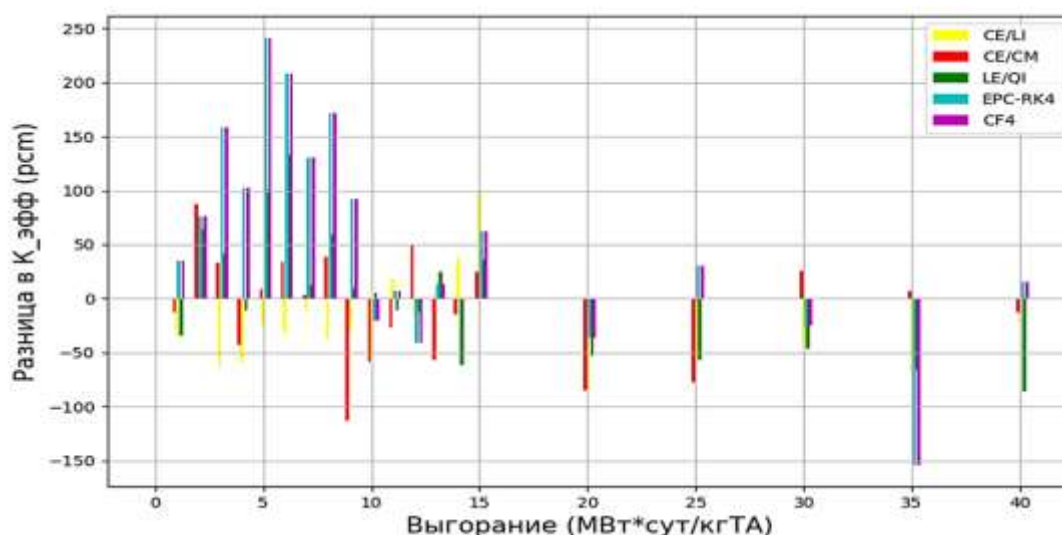


Рисунок 8 – Отклонения $K_{\text{эфф}}$ для интеграторов *OpenMC* от *PI* с мелким шагом по выгоранию [Deviations of K_{eff} for *OpenMC* integrators from *PI* with fine pitch on burnout]

Кроме того, хочется добавить, что использование интегратора *PI* при моделировании выгорания ТВС, содержащих выгорающие поглотители, оказывается неэффективным, т.к. уменьшение шага в 4 раза не позволяет достигнуть сопоставимой с другими интеграторами точности, а при этом на расчет требуется больше времени, поскольку интегратор *CE/LI* тратит на такой же расчет 2 единицы времени, вместо 4.

3.2 Сравнение с расчетным бенчмарком *VVER-1000 LEU and MOX*

В бенчмарке *VVER-1000 LEU and MOX* ТВС моделирование $K_{\text{эфф}}$ в процессе выгорания для ТВС *LEU* было выполнено пятью различными кодами: *MCU*, *TVS-M*, *WIMS8A*, *HELIOS* и *MULTICELL*. На основе результатов, полученных по этим кодам, для ТВС *LEU* был вычислен средний тренд $K_{\text{эфф}}$, зависящий от выгорания. А затем были построены отклонения трендов $K_{\text{эфф}}$, полученных по каждому из пяти кодов, от среднего тренда $K_{\text{эфф}}$. Эти результаты представлены на рисунке 9. Для выбранного в *OpenMC* интегратора *CE/LI* также было построено аналогичное отклонение результатов, полученных с его помощью, от среднего тренда $K_{\text{эфф}}$. При этом результаты, полученные по *OpenMC*, не были использованы при построении среднего тренда $K_{\text{эфф}}$.

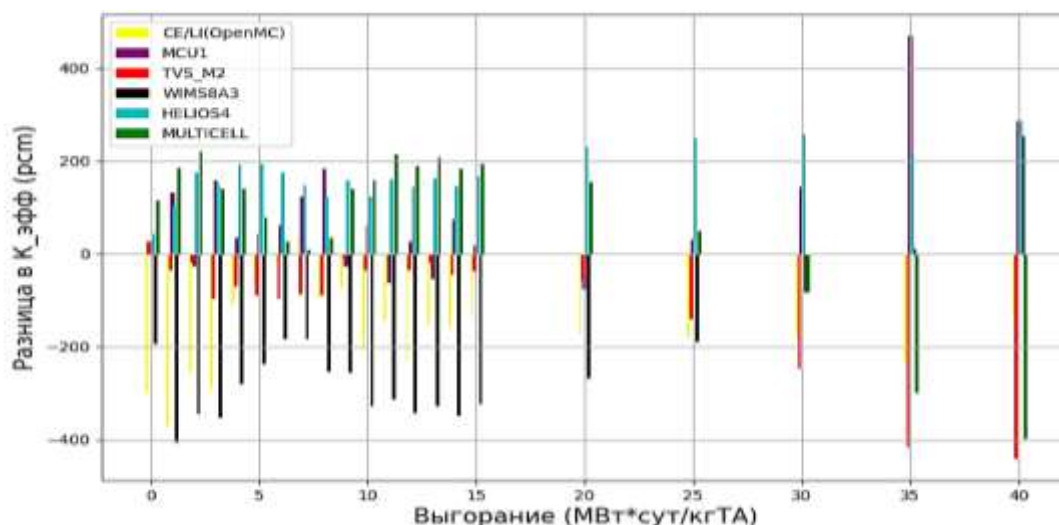


Рисунок 9 – Отклонения кодов *MCU*, *TVS-M*, *WIMS8A*, *HELIOS*, *MULTICELL* и *CE/LI OpenMC* от среднего тренда $K_{\text{эфф}}$ для ТВС *LEU* [Deviations of *MCU*, *TVS-M*, *WIMS8A*, *HELIOS*, *MULTICELL* and *CE/LI OpenMC* codes from the average K_{eff} trend for *LEU* fuel assembly]

Результаты, полученные с помощью интегратора *CE/LI* в составе кода *OpenMC*, показали хорошее совпадение с результатами, полученными по другим программам, т.к. максимальное отклонение не превышает 400 *pcm*, а отклонение до 1000 *pcm* считается приемлемым.

4 Выводы

Целью данной работы был выбор алгоритма численного интегрирования, используемого для моделирования выгорания ТВС, содержащих выгорающие поглотители, в коде *OpenMC*. Для моделирования выгорания в коде *OpenMC* можно использовать 8 различных численных интеграторов: *PI*, *CE/CM*, *LE/QI*, *CE/LI*, *CF4*, *EPC-RK4*, *SI-CE/LI*, *SI-LE/QI*. Результаты тестов показали, что интеграторам *SI-CE/LI*, *SI-LE/QI* требуется значительно больше времени для расчета одного шага по выгоранию, чем остальным при одинаковой точности, поэтому они были исключены из дальнейшего рассмотрения. Интегратор *PI* показал низкую точность интегрирования при одинаковых шагах по выгоранию с другими интеграторами. Однако *PI* обладает высоким быстродействием в сравнении с другими интеграторами и по мере уменьшения шага интегрирования обладает сходимостью к одному решению, которое может быть выбрано как реперное для оценки качества других интеграторов. На основе результатов, полученных с использованием интегратора *PI* с мелким шагом, было принято решение использовать для дальнейшей работы интегратор *CE/LI*. Результаты, полученные с помощью *CE/LI*, были сравнены с результатами, полученными в бенчмарке *VVER-1000 LEU and MOX* по кодам: *MCU*, *TVS-M*, *WIMS8A*, *HELIOS*, *MULTICELL*, и показали хорошее совпадение. Таким образом, можно сделать вывод о применимости интегратора *CE/LI* в составе *OpenMC* для моделирования выгорания ТВС, содержащих выгорающие поглотители.

Дополнительно для корректного моделирования выгорания следует отметить важность разбиения твэг на зоны с независимыми материальными составами.

При проведении работ были использованы ресурсы высокопроизводительного вычислительного центра НИЯУ МИФИ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Romano P.K., Horelik N.E., Herman B.R., Nelson A.G., Forget B., Smith, K. Openmc: A state-of-the-art monte carlo code for research and development. *Annals of nuclear Energy*, 2015, V. 82, pp. 90-97.
2. Dufek J., Kotlyar D., Shwageraus E. The stochastic implicit euler method—a stable coupling scheme for monte carlo burnup calculations. *Annals of nuclear Energy*, 2013, V. 60, pp. 295-300.
3. Iserles A., Munthe-Kaas H.Z., Nørsett S.P., Zanna A. Lie-group methods. *Acta numerica*. Acta Numer, 2000, V. 9, pp. 215-365.
4. Isotalo A.E., Aarnio P. Higher order methods for burnup calculations with bateman solutions. *Annals of nuclear Energy*, 2011, V. 38, pp. 1987-1995.
5. Josey. Development and analysis of high order neutron transport-depletion coupling algorithms, Ph.D. thesis, (Massachusetts Institute of Technology, 2017).
6. Богданович, Р.Б. Полная энергия деления в зависимости от глубины выгорания топлива для ВВЭР-1000 / Р.Б. Богданович Р.Б., А.С. Герасимов, Г.В. Тихомиров // Журнал физики: Серия конференции. – 2020. – № 1439.
7. Thilagam L., Sunil Sunny C., Jagannathan V., A VVER-1000 LEU and MOX assembly computational benchmark analysis using the lattice burnup code EXCEL. *Annals of nuclear Energy*, 2009, V. 36, pp. 505-519.
8. NEA/NSC/DOC. A VVER-1000 LEU and MOX Assembly Computational Benchmark. Nuclear Energy Agency, 2002.
9. Park, J., Khassenov, A., Kim, W., Choi, S., Lee, D. Comparative analysis of vera depletion benchmark through consistent code-to-code comparison. *Annals of nuclear Energy*, 2019, V. 124, pp. 385-398.
10. Muir, R. E. M. and D. W. The NJOY Nuclear Data Processing System, 1994.

11. Leppänen, J. Serpent—a continuous-energy monte carlo reactor physics burnup calculation code. VTT Technical Research Centre of Finland. Vol. 4.
12. Jiankai Yu a, B. F. Verification of depletion capability of OpenMC using VERA depletion benchmark. *Annals of nuclear Energy*, 2022, V. 170.
13. Девятко, Ю.Н. Моделирование распределения температуры и выгорания в уран-гадолиниевом твэле ВВЭР / Ю.Н. Девятко, В.В. Новиков, О.В. Хомяков // *Физика атомного ядра*. — 2018. — № 81 — С. 1257-1275.

REFERENCES

- [1] Romano P.K., Horelik N.E., Herman B.R., Nelson A.G., Forget B., Smith, K. Openmc: A State-of-the-Art Monte Carlo Code for Research and Development. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, V. 82, pp. 90-97 (in English).
- [2] Dufek J., Kotlyar D., Shwageraus E. The Stochastic Implicit Euler Method—a Stable Coupling Scheme for Monte Carlo Burnup Calculations. *Annals of Nuclear Energy*, 2013, V. 60, pp. 295-300 (in English).
- [3] Iserles A., Munthe-Kaas H.Z., Nørsett S.P., Zanna A. Lie-Group Methods. *Acta Numerica*. Acta Numer, 2000, V. 9, pp. 215-365 (in English).
- [4] Isotalo A.E., Aarnio P. Higher Order Methods for Burnup Calculations with Bateman Solutions. *Annals of Nuclear Energy*, 2011, V. 38, pp. 1987-1995 (in English).
- [5] Josey. Development and Analysis of High Order Neutron Transport-Depletion Coupling Algorithms, Ph.D. thesis, (Massachusetts Institute of Technology, 2017) (in English).
- [6] Bahdanovich R, Gerasimov A, Tikhomirov G. Polnaya energiya deleniya v zavisimosti ot glubiny vygoraniya topliva dlya VVER-1000 [Total Fission Energy Depending on WWER-1000 Fuel Burnup]. *Zhurnal fiziki: Seriya konferencii* [Journal of Physics: Conference Series] 2020. No.1439 (in Russian).
- [7] Thilagam L., Sunil Sunny C., Jagannathan V., A WWER-1000 LEU and MOX Assembly Computational Benchmark Analysis Using the Lattice Burnup Code EXCEL. *Annals of Nuclear Energy*, 2009, V. 36, pp. 505-519 (in English).
- [8] NEA/NSC/DOC. A WWER-1000 LEU and MOX Assembly Computational Benchmark. Nuclear Energy Agency, 2002 (in English).
- [9] Park, J., Khassenov, A., Kim, W., Choi, S., Lee, D. Comparative Analysis of Vera Depletion Benchmark through Consistent Code-To-Code Comparison. *Annals of Nuclear Energy*, 2019, V. 124, pp. 385-398 (in English).
- [10] Muir, R. E. M. and D. W. The NJOY Nuclear Data Processing System, 1994 (in English).
- [11] Leppänen, J. Serpent—a Continuous-Energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. VTT Technical Research Centre of Finland. Vol. 4 (in English).
- [12] Jiankai Yu a, B. F. Verification of Depletion Capability of OpenMC Using VERA Depletion Benchmark. *Annals of Nuclear Energy*, 2022, V. 170 (in English).
- [13] Devyatko, Y.N., Novikov, V. V. & K. Modelirovanie raspredeleniya temperatury i vygoraniya v uran-gadolinievom tvele VVER [Modeling of Temperature and Burnup Distributions in the Uranium-Gadolinium Fuel Element of VVER]. *Fizika atomnogo yadra*. [Physics of the Atomic Nucleus] 2018, V. 81, pp. 1257-1275 (in Russian).

Selecting Burnup Algorithms in OpenMC Using the Calculated Benchmark of LEU Assembly and MOX Fuel

© 2023 Hamza A. Tanash¹, Denis A. Solovyov², Vyacheslav G. Zimin³, Alexey L. Lobarev⁴, Denis A. Plotnikov⁵, Nikolay V. Schukin⁶

National Research Nuclear University (MEPhI), Kashirskoyeshosse, 31, Moscow, Russia

¹ tanash_hamza@yahoo.com, ORCID iD: 0000-0002-7831-8516, WoS Researcher ID: ABD-2895-2022

² vulture@inbox.ru, ORCID iD: 0000-0002-0507-0839, WoS Researcher ID: AFT-1248-2022

³ vgzimin@mail.ru, ORCID iD: 0000-0002-0334-3741, WoS Researcher ID: L-5807-2109

⁴ lobarev.alexey@gmail.com, ORCID iD: 0000-0001-5258-3357, WoS Researcher ID: AFT-1155-2022

⁵ pda1995@gmail.com, ORCID iD: 0000-0001-9387-170x, WoS Researcher ID: AFT-1105-2022

⁶ pikenv@gmail.com, ORCID iD: 0000-0002-4228-7228, WoS Researcher ID: AFT-1678-2022

Received by the editorial office on 12/15/2022

After revision on 02/16/2023

Accepted for publication 02/21/2023

Abstract. OpenMC is a state-of-the-art Monte Carlo neutron transport simulation code that uses the Python programming language as an API. OpenMC supports eight burnout simulation algorithms. This study presents the results of choosing an integration method for modeling the burnup of fuel assemblies with burnable poisons for WWER-1000 reactors. Burnout simulation results from OpenMC were compared with those reported in the OECD benchmark. 8 different numerical integrators can be used to model burnout in OpenMC code: PI, CE/CM, LE/QI, CE/LI, CF4, EPC-RK4, SI-CE/LI, SI-LE/QI. The test results showed that the SI-CE/LI, SI-LE/QI integrators require significantly more time to calculate one burnup step than the others with the same accuracy, so they were excluded from further consideration. The PI integrator showed low integration accuracy at the same burnup steps with other integrators. However, PI has a high performance compared to other integrators, and as the integration step decreases, it converges to one solution, which can be chosen as a reference for assessing the quality of other integrators. Based on the results obtained using the fine step PI integrator, it was decided to use the CE/LI integrator for further work. The results obtained with CE/LI were compared with those obtained with the VVER-1000 LEU and MOX benchmark for codes: MCU, TVS-M, WIMS8A, HELIOS, MULTICELL and showed good agreement. Thus, we can conclude the applicability of the CE/LI integrator as part of OpenMC for modeling the burnup of fuel assemblies containing burnable poisons. During the work, the resources of the high-performance computer center of the National Research Nuclear University MEPhI were used.

Keywords: OpenMC, burnup, integration methods, OECD benchmark, WWER-1000 reactors, neutron transfer method, predictor integrator (PI), CE/LI Integrator, ENDF/B-VII.1 Neutron multiplication factor.

For citation: H.A. Tanash, D.A. Solovyov, V.G. Zimin, A.L. Lobarev, D.A. Plotnikov, N.V. Schukin. Selecting Burnup Algorithms in OpenMC Using the Calculated Benchmark of LEU Assembly and MOX Fuel // Global Nuclear Safety. – 2023. – No. 1(46). – P. 79-91 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2023-01-07>.

**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: 333.108
DOI 10.26583/gns-2023-01-08
EDN VUHALR

**КОРПОРАТИВНАЯ СИСТЕМА СОВРЕМЕННЫХ
ЯДЕРНЫХ ЗНАНИЙ**

© 2023 Сергей Васильевич Арсентьев

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия
SVArsentyev@mephi.ru*

Аннотация. В работе рассматриваются методические вопросы, связанные с формированием корпоративной системы современных ядерных знаний, которая является ядром новой парадигмы кадрового обеспечения атомной отрасли на современном этапе. Категория «Кадры/Знания» представляет собой основной элемент, который связывает между собой новую парадигму развития атомной отрасли, которая отражает логику развития атомного сектора, и новую парадигму управления, которая, в свою очередь, отражает структурные изменения в бизнес-среде XXI века. Эти две парадигмы составляют основу современной платформы инновационного развития атомной отрасли, как информационной основы принятия стратегических решений. Кадровое обеспечение атомной отрасли на современном этапе, являясь составной частью современной платформы, в то же время представляет собой одну из самых важных и сложных задач инновационного развития, решение которой имплементировано в корпоративную стратегию.

Ключевые слова: глобальная ядерная безопасность, инновационное развитие, современная платформа, кадровое обеспечение, современные ядерные знания.

Для цитирования: Арсентьев С.В. Корпоративная система современных ядерных знаний / С.В. Арсентьев // Глобальная ядерная безопасность. – 2023. – № 1(46). – С. 92-103 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2023-01-08>.

Поступила в редакцию 19.12.2022
После доработки 08.02.2023
Принята к печати 21.02.2023

Введение

В XX веке ядерная энергетика играла вспомогательную роль (главная отводилась военному использованию атомной энергии), так как особой нужды в новом источнике энергии не было. Кроме того, развитие сдерживалось рядом факторов, преодолеть которые в рамках существующей модели развития ядерной энергетики проблематично. Однако существует ряд объективных предпосылок того, что в XXI веке ядерная энергетика может и должна занять достойное место, но для этого надо переходить на другую модель развития. В рамках новой модели должны быть не только найдены удовлетворительные ответы на существующие сегодня ключевые вопросы функционирования ядерной энергетики (исключение тяжелых аварий; нераспространение ядерного оружия; эффективное топливоиспользование, переработка ОЯТ и обращение с РАО; инвестиционная привлекательность, повышение

конкурентоспособности и улучшение экономических показателей), но и учтены факторы, определяющие дальнейшее ее развитие (глобальная ядерная безопасность, социальная ответственность, экология, энергетический рынок и т.д.). Важная роль в осмыслении опыта использования атомной энергии и причин относительных неудач ядерной энергетики принадлежит теоретической науке («нет ничего более практичного, чем хорошая теория»).

Ключевыми факторами для будущего любой организации (коммерческой или некоммерческой) и целых отраслей, которые стремятся стать полноправными участниками XXI века, становятся совершенство, инновации, предвидение. Эта триада позволяет прогнозировать потребность клиентов, создавать новые продукты (услуги), которые нужны для их удовлетворения, и производить их с непревзойденным качеством. Эти три фактора помогут не просто выжить в XXI веке, но и добиться процветания. Парадигма – это система взглядов и представлений, в рамках которой мы воспринимаем окружающий мир и предсказываем его поведение в будущем, это набор норм и правил, который выполняет две функции: устанавливает границы и говорит, как надо действовать в пределах заданных границ, чтобы добиться успеха. Однако мир постоянно меняется и правила, которые хорошо работали в прошлом, могут стать тормозом к развитию. Смена парадигмы – это переход к новому своду правил.

Если ядерная энергетика, оказавшись в «тупике среднего возраста», собирается выжить, нам надо сменить свой образ мышления. Если ничего не менять, то наивно ожидать других результатов. Чтобы создавать новое, надо знать новое. Новые знания появляются благодаря науке. В бизнесе часто тоже приходится иметь дело с большими и запутанными проблемами. Решить такую проблему – все равно, что справиться с научной задачей. В настоящее время вследствие быстрого развития атомного сектора нет сложившихся научных традиций в области «современных ядерных знаний», но такие традиции необходимо развивать. Под «научными традициями» понимается совокупность исторических, технических и педагогических установок и суждений об основных положениях данной науки, которые наиболее глубоко и точно отражают истину и являются общим достоянием тех, кого можно считать специалистами в этой области. К сожалению, слишком часто обнаруживаем, что общеизвестное не является наилучшим приближением к истине, а наиболее глубокие и точные суждения не являются общим достоянием.

Если мы хотим изменить мир, сначала нужно изменить свой взгляд на него. Мир, в котором мы живем, перечеркивает все премудрости учебников по управлению рисками. Уязвимость нашего опыта и хрупкость нашего знания. Поэтому «важно находиться не там, где сейчас шайба, а где она окажется через какое-то время». Соответственно «нам нужны эксперты по завтрашнему дню, а кругом только эксперты по вчерашнему». И, кроме того, «нельзя рассчитывать, что гора, которую мы штурмуем, не изменится». Знания необходимы прежде всего для того, чтобы постоянно усложнять свою картину мира – чем сложнее устроен тот, кто управляет, тем лучше будет результат. Главная сложность не в том, чтобы решить проблему, а в том, чтобы правильно ее сформулировать. Сегодня экономика производства уступила место экономике информации и знаний. Знания – гарант конкурентоспособности, но сегодня главное – не накопление знаний, а сетевой характер знаний (коммуникации, коммуникативная среда). В экономике знаний самый ценный актив – специалисты. Бизнес переориентировался с *hards skills* на *soft skills* (ключевые способности: умение адаптироваться, мыслить системно, брать на себя ответственность). Интуитивные решения в бизнесе самые устойчивые, а лучший способ для развития интуиции – изучение искусства. Искусство представляет собой дополнительный (по отношению к науке) способ познания окружающего мира.

С началом реформ в атомной отрасли России (с 2006 г.) на фоне рассмотрения многочисленных вопросов по направлению «Кадры в атомной отрасли» на различных

совещаниях, форумах и семинарах автором рассматривалась тема «Кадровое обеспечение атомной отрасли» в двух аспектах: обобщенной теории («Новая парадигма кадрового обеспечения») и конкретной реализации в ряде отраслевых проектов («Безопасность и кадры»). Было показано, что при реализации тренда на инновационное развитие формируются новые парадигмы управления и развития атомной отрасли, и необходима новая модель кадрового обеспечения. Основу здесь составляет Корпоративная система современных ядерных знаний (КССЯЗ), для которой свойственен сетевой характер инновационных знаний (то есть тех, которые обеспечивают конкурентоспособность). Наличие КССЯЗ позволяет сформировать современную платформу инновационного развития атомной отрасли как информационную основу принятия стратегических решений, то есть использовать не только анализ на основе информации, но и метод синтеза на основе знаний. В данной работе рассматриваются методические вопросы, касающиеся места и роли КССЯЗ в решении задачи инновационного развития «Кадровое обеспечение – составная часть современной платформы инновационного развития атомной отрасли».

Безопасность и кадры

К настоящему времени совместными усилиями государств и международных организаций сформировался международно-правовой режим регулирования безопасного использования атомной энергии, участницей которого является и Российская Федерация. МАГАТЭ ввело в рассмотрение концепцию «3S» – взаимосвязь между областями ядерной и радиационной безопасности (safety), физической безопасности (security) и гарантий (safeguards). Концепция «3S» реализует системный подход в обеспечении безопасности в разных сферах ее проявления на основе рекомендаций МАГАТЭ и практики мирового сообщества. Регулированием вопросов безопасности занимаются государства, однако в рамках международного сотрудничества принимаются меры по обеспечению и укреплению безопасности в глобальном масштабе. Глобальный режим безопасности включает международные конвенции, принятые на международном уровне нормы безопасности МАГАТЭ, многостороннее и двустороннее сотрудничество. Глобальная ядерная безопасность рассматривается как комплексное решение задач в области ядерной и радиационной безопасности, физической защиты, нераспространения и ответственности.

В начале 2000-х годов МАГАТЭ выдвинуло концепцию «Сохранение ядерных знаний является необходимым условием безопасного развития ядерных технологий. Ядерные знания очень сильно связаны с вопросами кадров. Кадровая проблема – один из основных вызовов» и, в соответствии с ней, было сформировано новое направление – «Управление ядерными знаниями» (NKM). Сегодня в области управления знаниями МАГАТЭ выступает как идеолог и участвует в реализации ряда проектов: INIR-mission; поддержка национальных проектов по NKM; поддержка образовательных инициатив (академия менеджмента INMA, европейская сеть ядерного образования ENEN и др.); новая цифровая платформа по созданию потенциала в области ядерной энергии и т.д.

Следует также отметить кадровые проекты NEA/OECD: платформа NEST и образовательные инициативы правового департамента (ISNL, INLE, FINL).

Согласно Нормам МАГАТЭ по безопасности правительство обеспечивает условия для создания и поддержания компетентности всех сторон, несущих ответственность за безопасность установок и деятельности. В качестве важного элемента национальной политики и стратегии обеспечения безопасности осуществляется необходимая профессиональная подготовка для поддержания компетентности достаточного числа сотрудников, обладающих приемлемой квалификацией и опытом. Компетентность создается в контексте регулирующей основы обеспечения безопасности такими средствами как: техническое обучение; обучение на базе учебных заведений и других учебных центров; НИОКР.

Авария на АЭС «Фукусима-Дайичи» изменила ландшафт в ядерной сфере и продемонстрировала необходимость укрепления международно-правового режима безопасного использования атомной энергии как важнейшего элемента развития ядерной энергетики. Доклад МАГАТЭ по Фукусимской аварии – это технически всесторонняя, основанная на фактах и сбалансированная оценка аварии, направленная на установление причин и последствий, а также извлеченных уроках. Один из основных уроков аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи» – недостаточная оборона «в глубину» внешней институциональной системы ядерной безопасности (технический DiD может быть предметом отказа по общей причине через отказ институциональной системы ядерной безопасности). Отсюда вытекают и соответствующие рекомендации – укрепление основных барьеров внешней институциональной системы ядерной безопасности: Уровень А (сильная компетентная промышленность и заинтересованные институции); Уровень В (сильный и компетентный Регулятор); Уровень С (сильные и компетентные собственники и операторы АЭС). План действий МАГАТЭ по ядерной безопасности определяет программу работ по укреплению глобальной системы ядерной безопасности (12 направлений: 1); ... 3) Противоаварийное планирование и готовность; ... 7) Международно-правовые механизмы; ... 9) Создание потенциала; ... 12) НИОКР). Успех Плана зависит от вовлеченности заинтересованных сторон: 1) МАГАТЭ (Группа действий по ядерной безопасности); 2) государства-члены (регулирующие органы; эксплуатирующие организации; ядерная отрасль; организации технической поддержки; исследовательские институты; образовательные учреждения); 3) другие международные организации (NEA/OECD; ВАО АЭС и т.д.). Отметим также и рекомендации группы INLEX: установление глобального режима ядерной ответственности (присоединение к международным инструментам; принятие национальных законов; установление договорных отношений).

Инновационные процессы, обеспечивающие развитие ядерных технологий, должны сопровождаться инновационными процессами, уменьшающими риски глобальной ядерной безопасности. В работах [1, 2] изложен современный системный взгляд с учетом динамики изменений в атомном секторе на вопросы ядерной безопасности и ответственности за ядерный ущерб и на этой основе рассмотрены две задачи инновационного развития атомной отрасли: «Ответственность за ядерный ущерб как составляющая глобальной ядерной безопасности» и «Ядерное страхование: ориентация на рынок как источник конкурентного преимущества». Характерные особенности ядерного ущерба (потенциальная величина, трансграничный характер, возможность проявления через длительный период времени) привели к созданию особого режима гражданской ответственности в наднациональных рамках, поскольку режим общего права является неподходящим для специфических проблем в данной отрасли. Особый характер режима гражданской ответственности требует от эксплуатирующей организации обязательного обеспечения средствами для возмещения ущерба пострадавшим и, соответственно, приводит к необходимости иметь финансовые инструменты для реализации механизма компенсации ядерного ущерба. Международный режим ответственности за ядерный ущерб формируется соответствующими международными конвенциями и протоколами, вносящими в них поправки. Ответственность за ядерный ущерб является составной частью глобальной ядерной безопасности и одновременно выступает связующим звеном между ней и развитием ядерных технологий. Именно в этой области сосредоточен баланс между адекватной компенсацией за ущерб и защитой инвесторов, который формируется правовыми рамками и финансовыми инструментами. К финансовым инструментам относятся методологии оценки стоимости ущерба, схемы компенсации и, конечно, ядерное страхование. Ядерное страхование в настоящее время рассматривается как раздел знаний, являющийся составной частью безопасности ядерных технологий.

В Решениях VII и VIII Международных Ядерных Форумов «Безопасность ядерных технологий» (2012 г., 2013 г.) было записано: «Форум рекомендует внедрение системы знаний по ядерному страхованию в образовательный процесс для предприятий атомной отрасли» и «Форум рекомендует совершенствование стратегии кадрового обеспечения атомной отрасли как одного из аспектов безопасности ядерных технологий, уделив особое внимание вопросам формирования системы современных ядерных знаний, а также корпоративной политики в области человеческих ресурсов». В соответствии с этими рекомендациями была разработана программа дополнительного профессионального образования «Ядерное страхование для предприятий атомной отрасли» и начата ее реализация в НИЯУ МИФИ [3, 4]. В Решении XVI Международного Ядерного Форума «Безопасность ядерных технологий» (2022 г.) записано «Поддержать предложения, направленные на развитие программ обучения по вопросам обеспечения ядерной безопасности в атомной энергетике и промышленности в высших и средних специальных учебных заведениях отрасли. Рекомендовать НИЯУ МИФИ совместно с «Техническая академия Росатома» проработать вопрос о создании учебного центра, специализирующегося на вопросах ядерной безопасности, уделив основное внимание формированию корпоративной системы современных ядерных знаний».

Современная платформа инновационного развития

Корпоративная стратегия атомной отрасли должна определять развитие ядерных технологий с учетом вопросов безопасности и конкурентоспособности и строиться на основе современной платформы инновационного роста атомной отрасли, которая включает новые парадигмы усовершенствования и управления, а также новые задачи инновационного прогресса.

На современном этапе развитие атомной отрасли – это формирование некоторой «Системы», основными центрами которой являются «Безопасность», «Конкурентоспособность», «Развитие ядерных технологий», «Кадры/Знания».

Развитие ядерной энергетики на первом этапе проходит под лозунгом «Atoms for peace» и характеризуется как внедрение ядерных технологий (разрабатываемых в первую очередь в военной сфере) для мирного использования, их эволюционное развитие и масштабирование. «Безопасность, надежность, экономическая эффективность» – этот слоган отражает парадигму первого этапа развития ядерной энергетики.

Выделим основные особенности динамики изменений в атомном секторе: 1) осмысление опыта использования атомной энергии, причин относительных неудач ядерной энергетики в XX веке и поиск ответов на существующие вопросы (исключение тяжелых аварий; нераспространение ядерного оружия; топливоиспользование, ОЯТ, РАО; инвестиционная привлекательность ядерной энергетики); 2) учет новых факторов развития атомной энергетики и ядерных технологий в целом (таких как глобальная ядерная безопасность, конкурентоспособность, социальная ответственность); 3) глобальное развитие и глобализация атомного сектора (развитие ядерной энергетики в XXI веке – это по существу международный проект, в котором участвуют многие страны и международные компании); 4) атомная отрасль России (исторический аспект; публичная стратегия 2030 и проект «Горизонт»; диверсификация отрасли: инновационные продукты и высокие технологии для устойчивого развития).

Реформы в атомной отрасли России, которые можно условно свести в три основные группы: 1) стратегия развития отрасли; 2) инвестиционная политика; 3) программа структурных реформ, и которые отражают позицию руководства страны на роль атомной отрасли в современных условиях, привели к качественным изменениям: сформировалась новая маркетинговая среда (глубокая оптимизация ЯОК и рыночно-конкурентная среда для невоенной части атомной отрасли; решение накопленных проблем ядерного наследия и создание новых условий для систем

обращения с ОЯТ и РАО; формирование новой технологической платформы с решением задачи сохранения кадрового и научного потенциала), стала приоритетной проектная схема финансирования, и функционирует система управления через «вложенные» акционерные общества.

Изменения в атомном секторе привели к формированию схемы «стратегия-риски-стоимость», которая отражает переход от краткосрочных показателей (выручка, прибыль) отдельных предприятий к долгосрочным показателям (стоимость) бизнес-проектов и отрасли в целом. В соответствии с этим сформирован комплексный подход к рассмотрению рисков с позиции бизнеса в целом, который ориентирован на достижение корпоративных целей отрасли [5]. В основе модели, которая включает четыре аспекта (социальный: «современные ядерные знания», стратегический: «стратегическое мышление», коммерческий: «ориентация на рынок», операционный: «новое мышление, новые люди и новая организация»), лежит трехуровневая схема: «предприятие-проект-отрасль». Управление рисками – есть важная составляющая процесса создания стоимости, а стратегия управления вытекает из общекорпоративной стратегии отрасли. Для создания эффективных инструментов управления рисками современная модель взаимодействия атомной отрасли с другими рынками (например, рынком образовательных услуг) предполагает наличие нового инновационного элемента со своими конкретными функциями.

Отметим структурные изменения в бизнес-среде XXI века в целом. Помимо «турбулентности» рыночной среды и скорости изменения в ней, сегодня это не только «отрасль» и «рынок», но и «общество» в целом (глобальная ядерная безопасность, социальная ответственность, экология, «энергетическая корзина» должны быть встроены в бизнес-стратегию и анализ конкуренции), что порождает тройной уровень задач: предприятие – проект (в отрасли) – отрасль (в рынке). На смену развитию технологии и финансовых показателей (краткосрочных), которые были характерны для бизнеса XX века, приходят развитие «Системы» и ценность для общества (долгосрочная), которые определяют суть бизнеса XXI века. Здесь «Система» – это «Безопасность – Технологии XXI – Конкурентоспособность – Кадры/Знания». Глобальное развитие «Системы» в условиях глобализации – это новая парадигма развития атомной отрасли. При этом составляющие этой «Системы» качественно меняют свое содержание. Безопасность теперь включает не только технические и юридические аспекты, но и стратегические и экономические. Технология – это уникальная комбинация людей, идей и объектов, созданная для достижения конкретной цели. При этом инновационный процесс рассматривается как единая сеть, объединяющая людей, идеи и объекты таким образом, что возникают эффективные и долговечные организации и технологии. Конкурентоспособность при этом означает быть нужным, а не лучшим. Кадры/Знания – это новая парадигма кадрового обеспечения. При этом информация и анализ, которые были информационной основой стратегии XX, дополняются знаниями и синтезом, без которых невозможно представить стратегию XXI. Руководители вместо стратегии пишут перспективный план, где нет главного: за счет чего получают конкурентные преимущества. Подробный план – это не стратегия, а всего лишь средство самоуспокоения. Стратегия должна строиться не вокруг продукта, а вокруг потребителя; сейчас основа бизнеса – не завод или продукт, а потребитель и рынок. Налицо новая парадигма управления: Стратегия – Инновации/Дизайн – Стоимость / Риски – Кадры/Знания. Связующий элемент между новой парадигмой развития и новой парадигмой управления, которые составляют основу современной платформы инновационного развития атомной отрасли, – Кадры/Знания.

Современный менеджмент выработал запас прочности, а новые факторы меняют бизнес, структуру предприятий и методы работы пользователей. Существующие стратегии и оргструктуры часто не обладают достаточной гибкостью, чтобы можно

было мобилизовать инновационные кадры и технологии для решения возникающих задач. Нужно выработать особое мышление, культуру и процессы. Современным платформам нужны новые стили руководства.

Инновации и дизайн – главные факторы конкурентной стратегии. Лидерство в области инноваций – ключевой фактор конкурентного преимущества. Стратегическая направленность, системность, клиентоцентричность (ориентация на рынок/клиента) инноваций. Инновации – это епархия маркетологов, а не разработчиков. Стратегический маркетинг является частью процесса инновационных разработок. Настоящая сила маркетинга заключается в создании новых рынков. Важнейшая черта инновационной организации – в высшей степени грамотная кадровая политика. Большая часть инвестиций на инновации не опирается на четкую стратегию, слабо привязана к основному бизнесу и управляется из рук вон плохо. Инновации – не самоцель, а средство достижения намеченных целей. Эффективные инновации ориентируются на технологии, способные сформировать новые рынки, и на «высшие потребности потребителей». Создавать новые рынки компаниям мешают ментальные модели руководителей, их представления о том, как устроен мир.

Дизайн-мышление для решения масштабных задач. Дизайн выходит за пределы мира вещей: его новой сферой становятся стратегии, большие системы, реформы. Разворачивание новой системы или вывод на рынок нового продукта надо рассматривать как дизайнерскую задачу. Истоки успеха Samsung – в решении компании о необходимости развивать у себя дизайн, который является главным фактором глобальной конкуренции в XXI веке. Никакой разницы между бизнес-стратегией и дизайном больше нет, а между инновациями и дизайном – тонкая грань.

Инновационное развитие атомной отрасли означает следующее: 1) масштабность и амбициозность цели (энергоисточник с «нужными» свойствами; встроенность в бизнес XXI века; вписываемость в «энергетический портфель»; «новые бизнесы»: диверсификация отрасли); 2) научность (научный подход в отличие от своих «тайных» желаний, чужих «авторитетных» мнений, склонности к утопическим теориям; нам нужен не только анализ, но и другой тип исследований – синтез, основанный на знаниях, а не на информации); 3) системность (глобальное развитие «Системы: безопасность – технологии – конкурентоспособность – кадры/знания» в условиях глобализации); 4) современная платформа (как информационная основа принятия стратегических решений). Пример встроенности в бизнес – космическая индустрия. Сегодня это глобальная и многогранная отрасль, где львиную долю доходов приносит коммерческая деятельность.

Кадровое обеспечение: новая парадигма

Инновационное развитие атомной отрасли требует инновационных подходов к решению задачи кадрового обеспечения, которая является одной из наиболее сложных и важных проблем современного этапа. Самое главное здесь – разработка и реализация «стратегии кадрового обеспечения» атомной отрасли и наличие «системы менеджмента», которая способна сделать это. К сожалению, часто стараются решать не самую нужную задачу, а ту, которую «решать удобно». Решение задачи «Кадровое обеспечение: новая парадигма» позволяет нам надеяться «заглянуть за горизонт». И здесь важно «встроить» решение в корпоративную стратегию атомной отрасли и «включить» его в современную платформу инновационного развития. Важность этой задачи диктует необходимость сформировать стратегию (политику) кадрового обеспечения, обозначая «Видение» («куда мы идем?»); «новая парадигма кадрового обеспечения») и «Миссию» («кто мы и чем занимаемся?»); «аудитор знаний/КССЯЗ»). Стратегия вовсе не про то, что мы будем делать в будущем, она про то, что мы делаем сейчас для того, чтобы придать будущему выгодные для нас очертания». Решая текущие задачи по построению КССЯЗ, мы движемся в направлении «Новая парадигма

кадрового обеспечения атомной отрасли», которая тесно связана с инновационным развитием.

До недавнего времени кадровое обеспечение сводилось к сумме подготовки кадров, за которую в значительной степени отвечали вузы, и кадровой политики, за которую, в свою очередь, несла ответственность атомная отрасль. С началом реформ произошли существенные изменения в содержании этих составляющих.

Подготовка кадров связана с категорией «образование». В настоящее время по миру идет волна реформ высшего образования. Меры, которые сегодня применяются (укрупнение вузов и построение университетов-лидеров, создание исследовательских университетов, привлечение преподавателей и ученых из-за рубежа, международное сотрудничество и т.д.), направлены на то, чтобы переформатировать образование, поднять его в целом на новую качественную ступень [6]. Кроме того, мировой образовательный ландшафт стремительно меняется благодаря активному внедрению онлайн-образовательных платформ (Coursera, Udacity, Edx) и MOOCs (mass open online courses: открытые образовательные площадки) [7]. Человеческий ресурс создается образовательной системой, и сегодня страна, которая хочет быть сверхдержавой, обязательно должна иметь современное научно-техническое и управленческое образование. Нужно против системы непрофессионализма строить тоже систему, стратегию, а не разовые проекты. В большинстве областей современного знания качественное образование возможно только там, где ведутся научные исследования, и именно необходимость иметь преподавателей, полноценно участвующих в научной жизни, заставляет страны строить собственные исследовательские университеты.

Работа по совершенствованию подготовки кадров для атомной отрасли ведется по разным направлениям (создание НИЯУ МИФИ, формирование НОЦов, заключение соглашений о стратегическом партнерстве между образовательными учреждениями и предприятиями, участие НИЯУ МИФИ в международных образовательных проектах и т.д.). Что касается управленческого образования, то следует отметить наметившуюся тенденцию на формирование нового взгляда на бизнес-образование. «Наука о менеджменте игнорирует широкий контекст, в котором функционирует бизнес, предпочитая отстаивать интересы отдельных предприятий, часто в ущерб остальной части общества. Задача – сформулировать более человеческий взгляд на бизнес. Такое направление в науке о менеджменте, появившееся в последние годы, можно назвать тенденцией» [8]. «Экономическая наука сегодня бесконечно далека от реальной экономической деятельности, и это наносит урон, как обществу, так и самой дисциплине. Экономика в том виде, в котором ее сегодня преподают в университетах, имеет мало общего с управлением бизнесом и еще меньше – с предпринимательством. Степень оторванности экономической теории от повседневной деятельности человеческого общества поражает и удручает. Рассматривать экономику как науку об ограниченности и выборе, игнорируя влияние общества, истории, культуры и политики на хозяйственную деятельность человека, – равносильно самоубийству» [9].

Ядерное образование определяется ядерными специальностями, которые формируют базовые «критические» знания, и имеет существенную специфику. Современное ядерное образование, отвечая на вопрос «как учить?», предполагает элитарность («великие нации в критические моменты своей истории создавали новые и по форме, и по содержанию учебные заведения, как правило элитного характера»), целевую направленность (переход от «управления по планам» к «управлению по целям») и высокий уровень интеграции образования, науки, бизнеса (основа для сохранения и развития ядерных знаний). К современному ядерному образованию нужно подходить как к стратегическому активу. С возросшей тягой к знаниям сильно вырос спрос на специализированные программы, составленные под конкретного заказчика. Все больше специализированных программ появляется после того, как совет

директоров той или иной компании приходит к выводу, что именно с помощью специально составленной программы компания сможет решить стоящую перед ней стратегическую задачу. Теперь на первый план выходит обучение, и именно оно становится главным фактором, который влечет за собой стратегические перемены в корпоративном мире. Обучение и развитие становятся стратегическими приоритетами компании. Именно с помощью такого подхода отдельные компании и атомная отрасль в целом могут решить стоящие перед ними стратегические задачи.

Кадровая политика связана с категорией «бизнес». Основные задачи отраслевой кадровой политики ГК «Росатом», которые были решены в период 2011-2015 гг.: формирование бренда «Росатома» как работодателя на рынке труда, создание отраслевой системы информирования и рост вовлеченности персонала, создание сильных программ развития кадрового резерва. Глобальные изменения в бизнесе и атомном секторе на современном этапе порождают новые задачи («задачи инновационного развития») и, соответственно, нужны «новые люди», которые смогут решать эти задачи. Корпоративная кадровая политика, где главные направления – «квалификация» и «мотивация», будучи инструментом работы с социальными рисками, и должна дать ответ на вопрос для чего учить? (для каких задач?).

Кадровое обеспечение связано с категорией «наука» (чему учить? кого учить? кто будет учить? где учить?). В работах [10, 11] рассмотрена задача инновационного развития атомной отрасли («Кадровое обеспечение – составная часть современной платформы инновационного развития атомной отрасли») и приведены основные результаты рассмотрения этой задачи. В основе стратегии кадрового обеспечения лежит новая парадигма, переход к которой обусловлен необходимостью создания инновационных инструментов для решения задачи кадрового обеспечения атомной отрасли на современном этапе. В современных условиях понятие «кадровое обеспечение» вместе с такими понятиями как «подготовка кадров» и «кадровая политика» формируют так называемый «кадровый треугольник», все элементы которого, решая свои задачи, должны работать в единой логике. «Бизнес» («Кадровая политика») формирует требования к кадрам с учетом глобальных изменений и социальных рисков (квалификация и мотивация). «Образование» («Подготовка кадров») обеспечивает базовые «критические» знания в условиях реформы образования. «Наука» («Кадровое обеспечение») генерирует «инновационные» знания, формируя КССЯЗ. Центральным элементом новой парадигмы кадрового обеспечения атомной отрасли в условиях современной маркетинговой среды является корпоративная система современных ядерных знаний, которая должна обеспечивать развитие ядерных технологий, а также безопасность и конкурентоспособность. В состав корпоративной системы современных ядерных знаний входят: а) «современные ядерные знания» (включают базовые «критические» и «инновационные» знания, т.е. знания, которые должны обеспечить конкурентное преимущество; традиционного знания, которое мы получаем в школах и университетах, теперь недостаточно); б) «человеческие ресурсы» (носители современных ядерных знаний, востребованные и мотивированные); в) «коммуникативная среда» (для сохранения и развития ядерных знаний), основные процессы в такой «коммуникативной среде»: 1) реструктуризация (сохранять надо то, что пригодится в будущем, а это определяется корпоративной стратегией отрасли); 2) развитие (это главное условие сохранения ядерных знаний, без развития сделать это невозможно); 3) внедрение (в образовательный процесс для студентов и специалистов отрасли через повышение квалификации и переподготовку). В инновационных знаниях можно выделить три группы: отраслевые знания, знания о бизнес-среде и «гуманитарные» (социальные аспекты). Большая часть инновационных знаний – это «неявные» знания (влияние человеческого фактора), то есть это не научная объективность, а наш опыт.

Человеческие ресурсы в атомной отрасли – это носители современных ядерных знаний, которые востребованы отраслью и мотивированы. Мотивация в значительной мере определяется уровнем задач (которые решают) и командой людей (с которыми работают). Взгляд на мотивацию должен отражать реальную жизнь и не быть упрощенным, так как новое поколение специалистов все в большей мере придерживается концепции «управление собственной жизнью». Мы живем в эру самостоятельного развития карьеры. Понятие карьеры в компании – это миф, инструмент манипулирования и эксплуатации сотрудника обещаниями карьеры. Правильное понимание себя способно превратить человека – трудолюбивого и компетентного – в незаурядного профессионала. Однако большинство учителей и организаций сосредоточиваются на превращении некомпетентных исполнителей в посредственных. Вместо этого энергию, ресурсы и время лучше потратить на воспитание выдающихся работников из компетентных людей. Еще одна тенденция в отношении человеческих ресурсов: на сегодняшний день профессиональное старение побуждает все большее число людей вернуться к обучению, обрести новые навыки и инструменты. Нормой становится не разовое образование, а «познание длиною в жизнь». Все это требует особой тщательности при разработке корпоративной политики в области человеческих ресурсов [12]. Корпоративная политика в области человеческих ресурсов определяет ту среду, в которой развивается «современное ядерное образование».

В новой парадигме за кадровое обеспечение должно отвечать исследовательское образовательное учреждение нового типа (центр формирования инновационных знаний и новых компетенций): университет плюс исследовательский центр плюс центр инноваций. Кто должен учить в таком исследовательском образовательном учреждении нового типа? В идеале – талантливый преподаватель, успешный предприниматель и сильный ученый в одном лице. Любой центр формирования новых компетенций является «коммерческой» структурой, и отсутствие «оптимальной» стратегии, а также системы менеджмента, отвечающей «оптимальной» стратегии на данном этапе, представляет собой пример типовых, но существенных слабостей такой структуры, которые могут быть сильнее традиций в подготовке специалистов в области использования атомной энергии, базы ядерных знаний и даже бренда.

Заключение

Рассматриваемая в данной работе «Корпоративная система современных ядерных знаний» (КССЯЗ) является ядром новой парадигмы кадрового обеспечения атомной отрасли на современном этапе ее развития. Главное здесь – сетевой характер знаний. Учебный курс «Стратегический маркетинг в атомной отрасли» (название условно) и предназначен для ознакомления с КССЯЗ как студентов, так и специалистов атомной отрасли.

Кадровое обеспечение в современных условиях – самостоятельная категория, которая не сводится к сумме подготовки кадров и кадровой политики, а взаимодействуя с ними, формирует текущие требования к последним.

Кадровое обеспечение атомной отрасли – это самая важная и самая сложная проблема (бизнес-проблема, а не проект) современного этапа развития атомной отрасли и, одновременно, важнейший элемент инновационного развития (без него невозможно инновационное развитие). Решение этой задачи позволит нам надеяться «заглянуть за горизонт».

Современная модель взаимодействия атомной отрасли с рынком образовательных услуг предполагает наличие «инновационного элемента» – «Центр формирования инновационных знаний и новых компетенций». По форме – это исследовательское образовательное учреждение нового типа (университет плюс исследовательский центр плюс центр инноваций), главным действующим лицом в котором должен быть талантливый преподаватель, успешный предприниматель и сильный ученый в одном

лице. В этом проявляется единство образования, науки и бизнеса, которые должны работать в единой логике.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Арсентьев, С.В.* Глобальная ядерная безопасность и ядерное страхование / С.В. Арсентьев, Н.И. Ольбинская // Актуальные вопросы международного ядерного права: правовая международная база атомной энергетики в XXI веке : сборник трудов симпозиума в рамках Форума «Атомэкспо-2013», г. Санкт-Петербург, 26 июня 2013 года. – Москва. – 2013. – С. 109-116.
2. *Арсентьев, С.В.* Ответственность за ядерный ущерб и ядерная безопасность / С.В. Арсентьев, Н.И. Ольбинская // Международный Форум «Атомэкспо-2014» : сборник докладов. – Москва : Росатом, 2014. – С. 147-150.
3. *Арсентьев, С.В.* Ядерное страхование и современная система ядерных знаний / С.В. Арсентьев // VIII Международный ядерный форум «Безопасность ядерных технологий: Культура безопасности на объектах использования атомной энергии» : сборник докладов. – Санкт-Петербург : [б.и.], 2013. – С. 288-289.
4. *Арсентьев, С.В.* Кадровое обеспечение атомной отрасли и сохранение ядерных знаний / С.В. Арсентьев, С.А. Королев // VIII Международный ядерный форум «Безопасность ядерных технологий: Культура безопасности на объектах использования атомной энергии» : сборник докладов. – Санкт-Петербург : [б.и.], 2013. – С. 285-287.
5. *Арсентьев, С.В.* Корпоративная система управления рисками предприятий атомной отрасли и подготовка кадров / С.В. Арсентьев // Ядерные измерительно-информационные технологии. – 2009. – № 2(30). – С. 119-122.
6. *Фалалеев, Д.* Другое высшее образование / Д. Фалалеев // Harvard Business Review-Россия. – 2010. – Апрель. – С. 45-51.
7. *Чернозатонская, Е.* Мои электронные университеты: учиться только у лучших / Е. Чернозатонская // Harvard Business Review-Россия. – 2014. – Ноябрь. – С. 34-41.
8. *Стюарт, М.* Мифы о менеджменте / М. Стюарт ; перевод с английского И.Е. Румянцева. – Москва: Аквариумная Книга, 2010. – 352 с.
9. *Коуз, Р.* Спасти экономику от экономистов / Р. Коуз // Harvard Business Review-Россия. – 2013. – Апрель. – С. 28.
10. *Арсентьев, С.В.* Корпоративная система ядерных знаний в условиях новой маркетинговой среды атомной отрасли / С.В. Арсентьев // Ядерные измерительно-информационные технологии. – 2012. – № 2(42). – С. 95-100.
11. *Арсентьев, С.В.* «Ядерные риски»: новый подход / С.В. Арсентьев // IX Международный ядерный форум «Безопасность ядерных технологий: Аварийная готовность и реагирование» : сборник докладов. – Санкт-Петербург : [б.и.], 2014. – С. 124-127.
12. *Друкер, П.* Классические работы по менеджменту : избранные статьи из журнала Harvard Business Review / П. Друкер ; Питер Друкер ; пер. с англ. И. Григорян, О. Медведь, С. Писарева. – Москва : Юнайтед Пресс, 2010. – (Сколково). – ISBN 978-5-904522-23-0. – EDN QUEORX.

REFERENCES

- [1] Arsenyev S.V., Olbinskaya N.I. Global'naya yadernaya bezopasnost' i yadernoye strakhovaniye [Global Nuclear Safety and Nuclear Insurance], Aktual'nye voprosy mezhdunarodnogo yadernogo prava: pravovaya mezhdunarodnaya baza atomnoj energetiki v XXI veke [Topical Issues of International Nuclear Law: International Legal Framework of Nuclear Energy in the 21st Century], Sbornik trudov simpoziuma v ramkah foruma "ATOMEKSP0 2013", g. Sankt-Peterburg, 26 iyunya 2013 goda [Proceedings of the Symposium at the Forum "Atomexpo-2013" 26 June 2013, St Petersburg]. Moscow, 2013, p. 109-116 (in Russian).
- [2] Arsenyev S.V., Olbinskaya N.I. Otvetstvennost' za yadernyj ushcherb i yadernaya bezopasnost' [Liability for Nuclear Damage and Nuclear Safety], V kn. Mezhdunarodnyj Forum «Atomekspo-2014» [International Forum "Atomexpo 2014"]. Moscow, 2014, p. 147-150 (in Russian).
- [3] Arsenyev S.V. Yadernoe strahovanie i sovremennaya sistema yadernyh znaniy [Nuclear Insurance and Modern Nuclear Knowledge System], V kn. VIII Mezhdunarodnyj yadernyj forum «Bezopasnost' yadernyh tekhnologij: Kul'tura bezopasnosti na ob'ektah ispol'zovaniya atomnoj energii». Sbornik dokladov [VIII International Nuclear Forum "Safety of Nuclear Technologies: Safety Culture at Nuclear Power Facilities". Collection of reports]. St Petersburg, 2013, p. 288-289 (in Russian).

- [4] Arsenyev S.V., Korolev S.A. Kadrovoe obespechenie atomnoj otrasli i sohranenie yadernyh znaniy [Nuclear Industry Staffing and Nuclear Knowledge Preservation], V kn. VIII Mezhdunarodnyy yadernyj forum «Bezopasnost' yadernyh tekhnologij: Kul'tura bezopasnosti na ob'ekтах ispol'zovaniya atomnoj energii». Sbornik dokladov [VIII International Nuclear Forum "Safety of Nuclear Technologies: Safety Culture at the Facilities of Nuclear Energy Use". Collection of reports]. St Petersburg, 2013, p. 285-287 (in Russian).
- [5] Arsenyev S.V. Korporativnaya sistema upravleniya riskami predpriyatij atomnoj otrasli i podgotovka kadrov [Corporate Risk Management System of Nuclear Industry Enterprises and Personnel Training], Yadernye izmeritel'no-informacionnye tekhnologii [Nuclear Instrumentation and Information Technologies], 2009, No. 2(30), p. 119-122.
- [6] Falaleev D. Drugoe vysshee obrazovanie [Other Higher Education], Harvard Business Review-Russia, 2010 April, p. 45-51 (in Russian).
- [7] Chernozatonskaya E. Moi elektronnye universitety: uchit'sya tol'ko u luchshih [My E-Universities: Learn Only from the Best], Harvard Business Review-Russia, 2014 November, p. 34-41 (in Russian).
- [8] Stewart M. Mify o menedzhmente [Myths about Management], perevod s anglijskogo I.E. Rumyantseva [Translated from English by I.E. Rumyantsev]. Moskva: Akvamarinovaya Kniga [Moscow: Aquamarine Book], 2010, 352 p. (in Russian).
- [9] Coase R. Spasti ekonomiku ot ekonomistov [Save the Economy from Economists], Harvard Business Review-Russia, 2013 April, p. 28 (in Russian).
- [10] Arsenyev S.V. Korporativnaya sistema yadernyh znaniy v usloviyah novoj marketingovoj sredy atomnoj otrasli [Corporate System of Nuclear Knowledge in Conditions of New Marketing Environment of Nuclear Industry], Yadernye izmeritel'no-informacionnye tekhnologii. [Nuclear Instrumentation and Information Technologies], 2012, No. 2(42), p. 95-100 (in Russian).
- [11] Arsenyev S.V. «Yadernye riski»: novyj podhod ["Nuclear Risks": New Approach], V kn. IX Mezhdunarodnyy yadernyj forum «Bezopasnost' yadernyh tekhnologij: Avarijnaya gotovnost' i reagirovanie». Sbornik dokladov [IX International Nuclear Forum "Safety of Nuclear Technologies: Emergency Preparedness and Response". Collection of reports]. St Petersburg. 2014, p. 124-127 (in Russian).
- [12] Drucker P. Klassicheskie raboty po menedzhmentu : izbrannye stat'i iz zhurnala Harvard Business Review [Classic Works on Management], perevod s anglijskogo [Translated from English]. Moscow: United Press, 2010 (Skolkovo) (in Russian).

Corporate System of Modern Nuclear Knowledge

© Sergey V. Arsenyev

*National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia
SVArsenyev@mephi.ru*

Received by the editorial office on 12/19/2022

After revision on 02/08/2023

Accepted for publication 02/21/2023

Abstract. The paper considers methodological issues related to the formation of a corporate system of modern nuclear knowledge, which is the core of the new paradigm of the nuclear industry staffing at the present stage. The category "Personnel/Knowledge" represents the main element which connects the new paradigm of nuclear industry development, which reflects the logic of nuclear sector development, and the new paradigm of management, which, in its turn, reflects the structural changes in the business environment of the XXI century. These two paradigms form the basis of the modern platform for innovative development of the nuclear industry as an informational basis for strategic decision-making. Nuclear personnel support at the present stage, being an integral part of the modern platform, at the same time represents one of the most important and complex tasks of innovative development, the solution of which, being implemented in the corporate strategy.

Keywords: global nuclear safety, innovative development, modern platform, staffing, modern nuclear knowledge.

For citation: Arsenyev S.V. Corporate System of Modern Nuclear Knowledge // Global Nuclear Safety. 2023. No. 1(46). P 92-103 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2023-01-08>.

**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 338.24 : 351.862.6 : 621.039
DOI 10.26583/gns-2023-01-09
EDN GUYDHY

**ЦИФРОВЫЕ ТРЕНДЫ В СТРАТЕГИЧЕСКОМ РАЗВИТИИ
ПРЕДПРИЯТИЙ АТОМНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
МАШИНОСТРОЕНИЯ**

© 2023 Мария Владимировна Головки¹, Александр Николаевич Сетраков²,
Светлана Васильевна Волгина³, Владимир Григорьевич Ткачев⁴

¹Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия

²Волгодонский филиал ФГКОУ ВО «Ростовский юридический институт Министерства внутренних дел
Российской Федерации, Волгодонск, Ростовская обл., Россия

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

¹golovko178@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4835-9800>

²aleksandr-maior@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5599-440X>

³SVVolgina@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3425-8627>

⁴VGTkachev@mephi.ru

Аннотация. В данной статье обоснованы преимущества цифровизации для стратегического развития промышленных предприятий. Определяются основные направления цифровой трансформации всех бизнес-процессов. Рассматривается опыт и представлены ключевые результаты реализации стратегии технологического развития машиностроительного дивизиона ГК «Росатом», особенности атомной энергетики как объекта управления.

Ключевые слова: цифровые технологии, атомное энергетическое машиностроение, промышленные предприятия, экономическая эффективность, АО «Атомэнергомаш», атомная энергетика, ГК «Росатом», атомные электростанции.

Для цитирования: Головки М.В., Сетраков А.Н., Волгина С.В., Ткачев В.Г. Цифровые тренды в стратегическом развитии предприятий атомного энергетического машиностроения // Глобальная ядерная безопасность. – 2023. – № 1(46). – С. 104-115 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2023-01-09>.

Поступила в редакцию 09.12.2022

После доработки 10.02.2023

Принята к публикации 21.02.2023

Достаточно широкое распространение на современном этапе получили вопросы исследования преимуществ цифровизации для целей обеспечения экономической эффективности хозяйствующих субъектов. Многочисленные исследования посвящены изучению положительного воздействия цифровых технологий на производительность труда, на оптимизацию издержек бизнеса, на создание инновационных рабочих мест, на повышение эффективности логистических, маркетинговых, производственных и других бизнес-процессов [1], что формирует конкурентные преимущества предприятий

в целом. Ряд экспертов полагают, что рациональная автоматизация процессов может стать механизмом обеспечения экономической безопасности [2]. В то же время отмечаются и негативные последствия цифровизации, связанные с необходимостью усиления контроля законности использования объектов интеллектуальной собственности, защиты информационных ресурсов и преодоления информационной асимметрии [3-5].

Консалтинговая компания «Gartner» в 2021 г. определила наиболее актуальные стратегические тренды в сфере цифровых технологий (рис. 1). В период коронавируса многие предприятия столкнулись со сложностями. Однако те хозяйствующие субъекты, которые до момента обострения эпидемиологической обстановки использовали актуальные технологии, получили возможности быстрого развития и усиления конкурентных позиций. В сфере промышленного производства эти технологии были связаны с автоматизацией и цифровизацией производственных процессов.

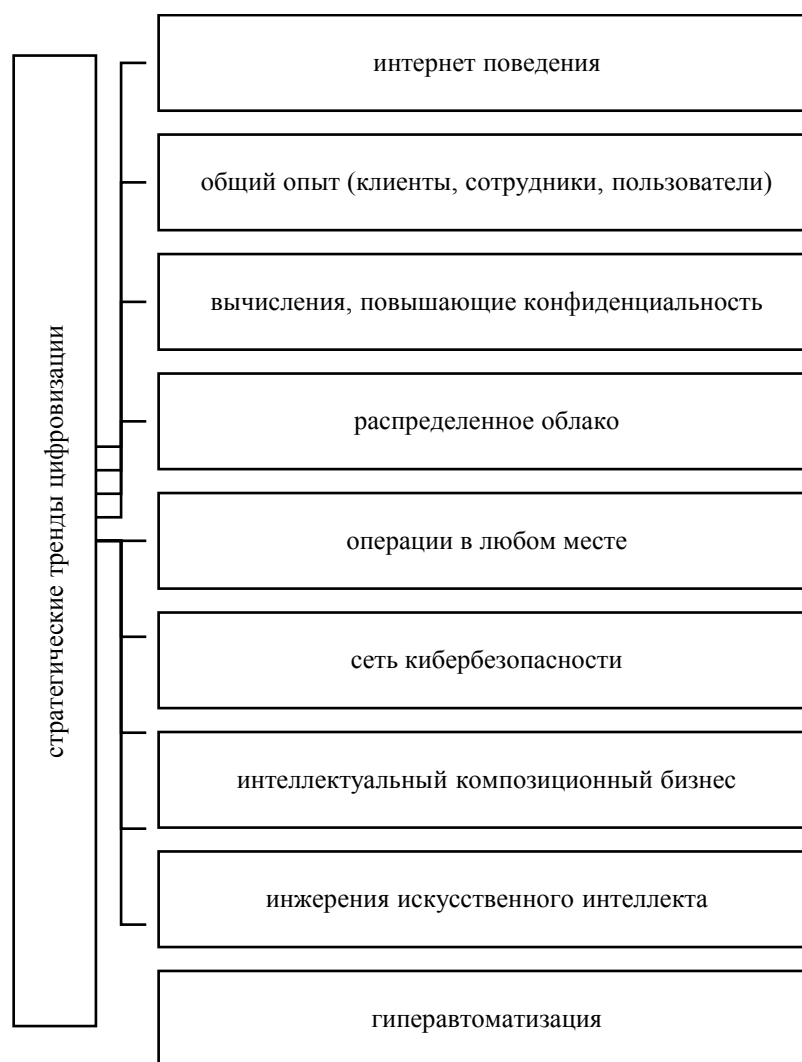


Рисунок 1 – Тренды цифровизации в 2021 г. по оценкам компании «Gartner» (составлено по [6])
[Digitalization trends in 2021 as estimated by Gartner (compiled from [6])]

Наибольшие преимущества в результате интеграции инструментов цифровизации в систему управления, безусловно, получают те предприятия, которые обладают развитой материально-технической базой, а также достаточными финансовыми возможностями для ее модернизации согласно тенденциям развития информационно-коммуникационных технологий. Тем не менее, основные направления, в рамках

которых осуществляются цифровые трансформации ведущих предприятий страны, могут стать определенным ориентиром для остальных экономических субъектов, вне зависимости от масштабов деятельности.

Так, в качестве приоритетов деятельности ГК «Росатом» определяет активное технологическое развитие и повышение эффективности. Миссией ГК «Росатом» является усиление геополитического влияния России за счет развития ГК «Росатом» на мировых высокотехнологичных рынках. Таким образом, видно, что в качестве желаемого конкурентного преимущества не только корпорации, но и страны в целом, обеспечивающим экономическую безопасность, заложено достижение лидерских позиций на технологических рынках. В стратегических целях это также нашло отражение: увеличение рыночной доли на международных рынках; снижение себестоимости производимой продукции и сроков протекания процессов; разработка и производство новых продуктов для российского и внешнего рынков.

Традиционные сферы деятельности ГК «Росатом», связанные с атомной энергетикой и ядерными технологиями, по-прежнему актуальны и рентабельны, однако, стратегия диверсификации и экспансии на внешние рынки является необходимым условием экономического развития корпорации в силу ограниченной емкости старых рынков. В результате происходит активное освоение направления «Новая энергетика» (в частности, ветроэнергетика), а также развитие неэнергетических направлений, в том числе, не связанных с атомной энергетикой. Среди них такие, как ядерная медицина и диагностика, лазеры и оптические системы, системы охраны и безопасности, робототехника, аддитивные технологии, предиктивная аналитика, искусственный интеллект и другие, связанные с необходимостью освоения цифровых технологий.

В то же время технологическую модернизацию деятельности госкорпорации, равно как и национальной экономики, сложно представить без формирования современной и производительной машиностроительной отрасли/дивизиона, которая бы соответствовала стандартам Индустрии 4.0. Одним из важнейших факторов развития процессов цифровизации в машиностроении является то, что практически все крупные российские предприятия организованы и функционируют по единым стандартам и применяют единые стандарты представления информации о жизненном цикле производимой продукции:

- СРПП – Национальный стандарт «Система разработки и постановки продукции на производство»;
 - ЕСКД – Единая система конструкторской документации;
 - ЕСТД – Единая система технологической документации;
 - ЕСТПП – Единая система технологической подготовки производства
- и др. [7, 8]

В результате подобной стандартизации для целей цифровизации необходимо обеспечить возможность создания проекта цифровой трансформации предприятий машиностроения, который бы обладал возможностями конфигурации в соответствии со специфическими особенностями каждого хозяйствующего субъекта, осуществляющего изменения.

В качестве еще одного значимого фактора развития концепции цифровизации российских предприятий можно отметить накопленный опыт (как отечественный, так и зарубежный) управления производством, одним из элементов которого является «бережливое производство», «синхронизация производственных потоков». Этот опыт должен быть положен в основу разработки цифровых технологий, внедряемых в системы управления производством. Эксперты отмечают необходимость создания и внедрения на предприятиях программно-информационной платформы на основе межотраслевых стандартов и требований к управлению производственными и бизнес-процессами на производстве.

Разработка и внедрение централизованной системы управления инженерными данными позволит добиться следующих преимуществ:

- повысит качество формирования требований к ресурсному обеспечению;
- обеспечит прозрачность и открытость предприятий для выстраивания кооперационных связей;
- станет основой для развития концепций расширенного предприятия и гибридного производства;
- обеспечит получение выгод заказчиками продукции промышленных предприятий при возможности валидации заявленных ресурсных потребностей для реализации проектов в рамках госзаданий, а также за счет формирования открытой среды для разработки и реализации проектов в сфере информационно-коммуникационных технологий для промышленных предприятий.

Другим аспектом цифровизации предприятий машиностроения является разработка стратегии внедрения технологий перевода в цифровой формат всего перечня необходимой конструкторской документации и технологической подготовки производства, что позволяет ускорить все процессы, включая организацию труда, и обеспечить конкурентные преимущества. Здесь находят применение комплексы систем автоматизированного проектирования (далее – САПР), баз данных и экспертных систем поддержки решения технологических задач. В современных условиях ужесточения внешнеэкономической и внешнеполитической обстановки, особое значение приобретают отечественные продукты в сфере программного обеспечения – «КОМПАС-3D», «Вертикаль», «ЛОЦМАН-PLM», «СПРУТ-Технологии» и др., которые дают возможность реализации сквозной интегрированной программно-информационной среды повышения эффективности подготовки производства [7]. Опции управления конфигурацией изделия позволяют быстро изменять конструкцию, модифицировать ее в соответствии с изменениями требований заказчика. В частности, это возможно осуществить с применением платформы PLM (Product Lifecycle Management) – «ЛОЦМАН:PLM». Технологии 3D-проектирования позволяют создавать цифровой образ изделия («КОМПАС-3D»), позволяют своевременно выявлять все недочеты и ошибки, изменять геометрию. Рассмотренные примеры являются одним из проявлений цифровой экономики [9].

Рассмотрим, каким образом в стратегии развития машиностроительного дивизиона ГК «Росатом» – АО «Атомэнергомаш» обозначены направления цифровой трансформации, которые создадут возможности увеличения выручки. В 2018 г., в рамках 10-го Международного форума, АО «Атомэнергомаш» и GeneralElectric (GE) был подписан Меморандум о взаимопонимании в области внедрения цифровых технологий в производстве. Согласно данному меморандуму, было запланировано развитие стратегического сотрудничества в области интеграции цифровых технологий в промышленное производство с целью обеспечения экономической и производственной эффективности, развития удаленного, с помощью дистанционных технологий, сервисного обслуживания производимого оборудования, оптимизации техпроцессов и загрузки станочного парка, повышения скорости принимаемых решений, разработки новых продуктовых решений для клиентов. Было принято решение о запуске пилотного проекта в производственных условиях Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонске. Начатое сотрудничество в современных условиях претерпевает определенные сложности, прогнозировать их развитие крайне затруднительно, однако, определенные достижения уже есть и могут быть положены в основу новых стратегических решений на базе отечественных технологий, получающих импульс развития в условиях кризиса.

Цифровизация постепенно переходит из современного тренда в необходимую для обеспечения экономического развития стратегию на всех уровнях экономики – от макро- (государства), до микро- (предприятие) и нано-уровня (уровень отдельной личности, человека). Национальная программа «Цифровая экономика», согласно данным Аналитического центра при Правительстве РФ, вовлекла в процессы практически все отрасли и сферы деятельности. Число госкоманий, разрабатывающих и внедряющих стратегию цифровизации выросло почти вдвое (с 25% до 48% в 2021 г.). В 2019 г. АО «Атомэнергомаш» разработал программу цифровизации в соответствии с целями цифровой стратегии ГК «Росатом», ориентируясь на цифровизацию управленческих и производственных процессов и дополнение цифровым «контентом» продукции для заказчиков. В таблице 1 представлены основные результаты цифровизации АО «Атомэнергомаш» за 2019 год.

Таблица 1 – Основные результаты реализации стратегии цифровизации АО «Атомэнергомаш» в 2019 г. (составлено по [10]) [Key results of Atomenergomash digitalization strategy in 2019 (compiled from [10])]

Наименование проекта	Площадка	Ключевые результаты
Проект системы базовых информационных сервисов с обеспечением доступа к информации из различных точек системы, в т.ч. расположенных за рубежом (для международного бизнеса и проектов)	АО «Атомэнергомаш»	Создан коммуникационный портал для обмена данными vCloud, 1 C:CRM, BI Qlik Sense между ОКУ (в том числе иностранными)
Формирование системы разработки и движения управленческой отчетности и визуализации данных (BI) для дивизиона	АО «Атомэнергомаш»	Цифровизация процессов бизнес-планирования портфеля заказов (1 C:CRM, QLIKSense)
Внедрение Информационной системы управления предприятием АО «АЭМ-технологии»	АО «АЭМ-технологии»	Запуск в промышленную эксплуатацию осуществлен в АО «АЭМ-технологии» и его филиалах
Внедрение системы управления производственными процессами (MES – Manufacturing Execution System) в Петрозаводском филиале АО «АЭМ-технологии»	АО «АЭМ-технологии», филиал АО «АЭМ-технологии» «Петрозаводскмаш»	Внедрен элемент системы – подсистема «Создание графиков загрузки рабочих центров» Создано мобильное приложение, позволяющее управлять графиком загрузки, обеспечивать выдачу сменно-суточных заданий и отмечать их фактическое выполнение
Проект внедрения системы управления рисками, предполагающей их актуальный реестр по бизнес-направлениям и функциональным системам	АО «ОКБМ Африкантов»	Разработана система управления рисками и возможностями, которая применяется для разработки и актуализации реестра проектных рисков бизнес-направлений и реестра рисков функциональных систем
Реализация проектов по автоматизации производства	АО «ОКБМ Африкантов»	Оптимизирован и переведен в электронный вид процесс запуска изделий в производство

«Цифровое» производство предполагает моделирование производственного цикла в виртуальной среде, аккумуляция информации о функционировании его элементов в режиме реального времени и автоматизированное управление всеми параметрами. Важное значение имеет сведение к минимуму воздействия человеческого фактора, способного привести к чувствительным паузам в работе или к аварийной ситуации. Усложнение технических устройств, крупные масштабы деталей приводят к необходимости работы с огромными массивами данных, что требует не просто автоматизации процессов, а сквозной цифровизации промышленного производства. Так,

в частности, в АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» вся разработка проектно-конструкторской документации переведена в цифровой формат. Экономия времени и экономических ресурсов заключается в том, что для разработки технического проекта реакторной установки требуется порядка 36 месяцев в около 3 тыс. документов для каждого проекта. Сегодня в электронном архиве собрано более 50 тыс. документов, цифровой формат которых облегчает и их хранение, и поиск, и обработку. Результаты реализации проекта цифровизации дивизиона за 2020 г. представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные результаты реализации стратегии цифровизации АО «Атомэнергомаш» в 2020 г. (составлено по [11]) [Key results of Atomenergomash digitalization strategy in 2020 (compiled from [11])]

Наименование проекта	Ключевые результаты
Внедрение системы мониторинга производственного оборудования Машиностроительного дивизиона ГК «Росатом», предполагающей подключение к ней всех ключевых единиц оборудования. Интеграция информационного обеспечения выполняется управляющей компанией	Проведен конкурс и заключен договор с исполнителем проекта. Осуществлена проработка технических параметров проекта. Получено финансирование (грантовая поддержка) в объеме 50% от стоимости проекта
Внедрение автоматизированной информационной системы управления требованиями, конфигурацией и изменениями Машиностроительного дивизиона ГК «Росатом». Используется при производстве и поставке оборудования для предприятий атомной отрасли, включая зарубежных заказчиков	Подготовлена и прошла согласование проектная документация. Разработаны и формализованы бизнес-процессы работы системы, подготовлены документы и объекты для проведения приемо-сдаточных мероприятий. Проводится подготовка к обучению пользователей системы.
Организация «цифровых коммуникаций» дивизионов АО «ТВЭЛ» и АО «Атомэнергомаш» в контуре PLM (product lifecycle management system) для взаимодействия ОКБМ и предприятий ТВЭЛ. В рамках проекта предполагается обеспечить обмен конструкторской документацией и данными в различных цифровых форматах для формирования единой цифровой среды управления жизненным циклом изделий организациями, входящими в контур сотрудничества	Приемо-сдаточные испытания проведены. Система подготовлена к опытной эксплуатации. Обеспечена возможность обмена составляющими цифровой модели при сквозном процессе разработке и реализации проектов
Цифровизация процесса обеспечения производственной и кадровой безопасности АО «АЭМ-технологии» (видеоаналитика средств индивидуальной защиты, интеллектуальная система контроля за соблюдением регламентов по охране труда и перемещением сотрудников в рабочей зоне)	Проект запущен на пилотных объектах
Проект внедрения системы математического и имитационного моделирования, не зависимой от импорта программного обеспечения (АО «ОКБМ Африкантов» и АО «АЭМ-технологии»)	Запущена пилотная эксплуатация расчетного комплекса «ЛОГОС»
Реализация проектов по автоматизации производства	Проведена оцифровка и оптимизация процесса запуска изделий в производство. Осуществляется диспетчеризация производственных процессов, процессов автоматизированного раскроя деталей, на специализированных терминалах аккумулируется информация о фактах завершения заданий в смене

В 2021 г. были достигнуты следующие результаты:

- завершен проект 2020 г., направленный на мониторинг эксплуатации промышленного оборудования;

- с целью повышения эффективности контроля за исполнением управленческого бюджета и оперативности формирования отчетности создана система бюджетирования и подготовки сводных данных по деятельности дивизиона;
- созданы цифровые двойники проектируемых атомных реакторов на предприятии АО «ОКБМ Африкантов»;
- реализованы проекты управления производственными процессами на предприятиях АО «ЦКБМ» и АО «АТМ»;
- в управляющей и ряде других компаний АО «Атомэнергомаш» внедрены эффективные механизмы управления проектной деятельностью [12].

В 2022 г. предприятия машиностроительного дивизиона столкнулись как с традиционными, так и нетривиальными задачами, обусловленными новой реальностью. В то же время определенные достижения в области цифровизации есть. Так, на предприятиях АО «Атомэнергомаш» в гг. Подольске, Волгодонске, Петрозаводске, Нижнем Новгороде, Санкт-Петербурге, внедрена система мониторинга производственного оборудования (СМПО), разработчиком которой является отечественная группа компаний «Цифра» [13]. Данная система дает возможность за счет установленных на станках блоков и датчиков осуществлять контроль за состоянием (температура, давление, вибрация, нагрузка), загруженностью и производительностью станков в режиме реального времени, мониторинг за коэффициентом эксплуатационной готовности, распределять простои, оповещать о возникновении внештатных ситуаций, фиксировать неполадки, выявлять причины их появления. Проект являлся приоритетным для дивизиона, поэтому был реализован гораздо раньше запланированного срока – за один год вместо двух. Информация аккумулируется и доступна в разрезе предприятий, цехов и отдельных станков. Это позволяет формировать базу данных для эффективной аналитики и принятия решений по оптимизации процессов, сокращению простоев, увеличению объемов производства. По оценкам экспертов, оптимальное изменение загрузки оборудования на 1% может позволить достичь эффекта, исчисляемого миллионами рублей. При этом бюджет проекта – 197,7 млн. руб., 95 млн. руб. из которых составляют средства Фонда «Сколково» в рамках национальной программы «Цифровая экономика РФ».

Еще одним проектом цифровизации стало создание на производственной площадке АО «ЗиО-Подольск» цифрового двойника при разработке реакторной установки РИТМ-200 для четвертого серийного ледокола «Чукотка». С помощью данного цифрового двойника осуществлялись расчеты динамики внутренних процессов, испытания системы управления, благодаря чему появилась возможность сократить цикл разработки новых реакторов за счет высокоточных расчетов и минимизировать число испытаний.

Предприятие ОКБ «Гидропресс» наработало определенный опыт использования CFD-технологий (Computational Fluid Dynamics, вычислительная гидроаэродинамика), относительно новых для всех атомной отрасли. Данная научная дисциплина появилась с активным развитием компьютерных технологий и является эффективным дополнением к конструкторской деятельности, дополняя ее [14]. Проведение CFD-расчетов позволяет получить больше информации о теплофизических процессах в оборудовании, что позволяет обеспечить его надежность и безопасность при эксплуатации на атомных электростанциях. Расчеты позволяют прогнозировать характеристики проектируемого оборудования, сравнивать их, рассчитывать поведение среды для насосов, реакторов, парогенераторов. Натурные эксперименты являются дорогостоящими и более длительными по времени, следовательно, развитие CFD-технологий также обладает серьезным экономическим эффектом, помимо технологической новизны.

Пример предприятий ГК «Росатом» является значимым не только потому, что своевременно осуществляется модернизация оборудования, но и происходит релевантная цифровизация организации производственных процессов, смена технологической платформы. Цифровая трансформация компании в целом, создание «цифровых заводов» – предполагают цифровые решения и технологии, смену стратегии управления производством и всем жизненным циклом изготовления оборудования. На примере одного из ведущих предприятий АО «Атомэнергомаш» – АО «АЭМ-технологии» – представим структуру «цифрового завода» на рисунке 2. Платформа «цифровой завод» позволяет планировать производственный поток на несколько лет вперед, оптимизировать загрузку оборудования, производить своевременный ремонт техники и внедрять другие цифровые решения – от имитационного моделирования до выдачи сменно-суточных заданий на смену через мобильное приложение.



Рисунок 2 – Элементы «цифрового завода» АО «АЭМ-технологии» (составлено по [15]) [Elements of the "digital factory" of AEM Technologies JSC (compiled from [15])]

На предприятиях машиностроительного дивизиона АО «Атомэнергомаш» реализуется политика поддержки инженерных решений, инициируемых сотрудниками предприятий. Цифровые тренды здесь могут стать эффективными инструментами формирования и рассмотрения заявок на оптимизацию и улучшение всех производственных процессов. Например, проект «Цифровые сервисы для людей» предполагает создание единой цифровой экосреды для обеспечения взаимодействия в рамках профессионального сообщества, организации командной работы и обучения персонала. Данный проект позволяет найти эксперта для совместного проекта, оформить командировку и тому подобное. В 2021-2022 гг. машиностроительным дивизионом был инициирован еще один проект – портал «Человек года Росатома», благодаря которому появилась возможность подавать заявку с использованием любого гаджета (компьютер, смартфон), согласовать ее, получить отзыв и доработать по замечаниям экспертов. Сокращение сроков обработки рационализаторских предложений позволяет более оперативно внедрять наиболее интересные из них в производственную деятельность, приводя к росту технологической и экономической эффективности.

Решения, которые будут в будущем характеризовать все промышленное производство, представлены на рисунке 3.

цифровой двойник	цифровое производство	предиктивная аналитика
• полноценная цифровая копия физического объекта или процесса, позволяющая в виртуальной среде точно моделировать то, что будет происходить с оригиналом в различных условиях	• полноценное моделирование производственных процессов в виртуальной среде, автоматизированный сбор информации о протекании процесса в режиме реального времени, автоматизированное управление параметрами производственного процесса	• анализ и прогнозирование влияния различных факторов на параметры выпускаемой продукции, прогноз возможных отказов оборудования

Рисунок 3 – Стратегические цифровые решения промышленного производства [Strategic digital solutions of industrial production]

По оценкам экспертов международной компании J'son & Partners Consulting, специализирующейся на телекоммуникационных, медийных и ИТ-рынках России, стран СНГ, Центральной и Восточной Европы и Центральной Азии, стратегия цифровизации российского машиностроения позволит обеспечить рост объемов выпуска гражданской продукции предприятиями ОПК с 16% до 30% к 2025 г., 50% к 2030 г. Достижение роста возможно, прежде всего, за счет импортозамещения иностранной продукции с российского рынка, что в современных условиях является крайне актуальным.

Также к желаемым результатам можно отнести модернизацию отечественного парка оборудования, доведение доли станков с числовым программным управлением

(ЧПУ) до 100%. Существенные экономические бизнес-эффекты цифровизации могут быть достигнуты в силу перечисленных выше технико-технологических и конкурентных эффектов, что позволит перейти к индустрии четвертого поколения (Индустрия 4.0) и решить актуальные проблемы российского машиностроения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алленых, М.А. Industry 4.0 в ядерной энергетике: экономическая эффективность цифровизации отрасли / М.А. Алленых, М.М. Осецкая // Друкеровский вестник. – 2020. – № 6(38). – С. 29-49.
2. Яковлева, А.В. Механизм экономико-правового обеспечения национальной безопасности: опыт, проблемы, перспективы / А.В. Яковлева, Р.Р. Алабердеев, С.М. Андросов [и др.]. – Краснодар : Научно-исследовательский институт экономики, 2012. – 537 с.
3. Gaponenko T.V. Gavrilenko S.A., Dovbysh V.Y. [et al.] Transformation of Risk Management in the Context of Digitalization of the Economy and Business // Modern Global Economic System: Evolutional Development vs. Revolutionary Leap: Institute of Scientific Communications Conference. Cham: Springer Nature, 2021. P. 1476-1482.
4. Головки, М.В. Теневая экономика в системе угроз экономической безопасности страны: факторы, эволюция, направления противодействия : специальность 08.00.05 «Экономика и управление народным хозяйством (по отраслям и сферам деятельности, в т.ч.: экономика, организация и управление предприятиями, отраслями, комплексами; управление инновациями; региональная экономика; логистика; экономика труда; экономика народонаселения и демография; экономика природопользования; экономика предпринимательства; маркетинг; менеджмент; ценообразование; экономическая безопасность; стандартизация и управление качеством продукции; землеустройство; рекреация и туризм)»: диссертация на соискание ученой степени доктора экономических наук / Головки Мария Владимировна. – Санкт-Петербург, 2020. – 426 с.
5. Гончарук, А.В. Использование технологии блокчейн для организации цепи поставок оборудования и ядерного топлива на АЭС / А.В. Гончарук // Энергетик. – 2018. – № 12. – С. 32-34.
6. Distributed cloud, AI engineering, cybersecurity mesh and composable business drive some of the top trends for 2021 [Электронный ресурс]. – URL : <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-strategic-technology-trends-for-2021> (дата обращения: 06.12.2022)
7. Булавин, В.Ф. PLM-стратегия в мелкосерийном производстве машиностроительной отрасли / В.Ф. Булавин, В.В. Яхричев, В.А. Глазков // Известия высших учебных заведений. Серия: Машиностроение. – 2018. – № 8. – С. 37-49.
8. Казакова, С.А. Комплексная цифровизация подготовки машиностроительного производства // С.А. Казакова, В.Ф. Булавин // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 1(3). – С. 44-47.
9. Казакова, С.А. CAD/CAPP-технологии в машиностроительном производстве / С.А. Казакова, В.Ф. Булавин, В.В. Яхричев и [др.] // Наука и современность – 2018 : Материалы XXXV Международной научной конференции – Москва : ЕНО, 2018. – Ч. 1, № 1(35). – С. 70-73.
10. Итоги деятельности АО «Атомэнергомаш» за 2019 г. [Электронный ресурс]. – URL : <https://aem-group.ru/mediacenter/herald/2019/?ysclid=ld4iojrf67766699665> (загл. с экрана) (дата обращения: 06.12.2022).
11. Итоги деятельности АО «Атомэнергомаш» за 2020 г. [Электронный ресурс]. – URL : <https://aem-group.ru/mediacenter/news/opublikovaniy-otchetnyie-materialyi-za-2020-g.html?ysclid=ld4ip2w87077608085> (загл. с экрана) (дата обращения: 06.12.2022).
12. Итоги деятельности АО «Атомэнергомаш» за 2021 г. [Электронный ресурс]. – URL : https://report.rosatom.ru/go/2021/aem_2021.pdf (загл. с экрана) (дата обращения: 06.12.2022).
13. Может, лучше про реактор // Вестник АЭМ 2.0. – 2022. – № 5 [Электронный ресурс]. – URL : <https://vestnik-aem.ru/upload/iblock/bd0/u22z4ricrdytwi3egzbxbpbhqrq6v172.pdf> (загл. с экрана) (дата обращения: 30.11.2022)
14. Волков, В. Расчеты в условиях неопределенности / В. Волков // Вестник АЭМ 2.0. – 2022. – № 2 [Электронный ресурс]. – URL : <https://vestnik-aem.ru/upload/iblock/c3d/zpaw207f8xelbntkdq8uol6jeiwpbrvj.pdf> (дата обращения: 30.11.2022)
15. Светлое цифровое будущее атомного машиностроения [Электронный ресурс]. – URL : <https://spec.tass.ru/aemtech/elementy-tsifrovogo-zavoda>. (дата обращения: 06.12.2022)

REFERENCES

- [1] Allenyh M.A., Oseckaya M.M. Industry 4.0 v yadernoj energetike: ekonomicheskaya effektivnost' cifrovizacii otrasli [Industry 4.0 in Nuclear Power: The Cost Effectiveness of Digitalization of the Industry] Drukerovskij vestnik [The Drucker Bulletin], 2020, No. 6(38), pp. 29-49 (in Russian).
- [2] YAkovleva A.V. Mekhanizm ekonomiko-pravovogo obespecheniya nacional'noj bezopasnosti: opyt, problemy, perspektivy [Mechanism of Economic and Legal Support of National Safety: Experience, Problems, Prospects]. Krasnodar: nauchno-issledovatel'skij institut ekonomik [Krasnodar: Research Institute of Economics], 2012, 537 p. (in Russian).
- [3] Gaponenko T.V., Gavrilenko S.A., Dovbysh V.Y. [et al.] Transformation of Risk Management in the Context of Digitalization of the Economy and Business // Modern Global Economic System: Evolutional Development vs. Revolutionary Leap: Institute of Scientific Communications Conference. Cham: Springer Nature, 2021, pp. 1476-1482 (in English).
- [4] Golovko M.V. Tenevaya ekonomika v sisteme ugroz ekonomicheskoy bezopasnosti strany: factory, evolyuciya, napravleniya protivodejstviya: special'nost' 08.00.05 "Ekonomika i upravlenie narodnym hozyajstvom (po otraslyam i sferam deyatel'nosti, v t.ch.: ekonomika, organizaciya i upravlenie predpriyatiyami, otraslyami, kompleksami; upravlenie innovatsiyami; regional'naya ekonomika; logistika; ekonomika truda; ekonomika narodonaseleniya i demografiya; ekonomika prirodopol'zovaniya; ekonomika predprinimatel'stva; marketing; menedzhment; cenoobrazovanie; ekonomicheskaya bezopasnost'; standartizaciya i upravlenie kachestvom produkci; zemleustrojstvo; rekreaciya i turizm)": dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni doktora ekonomicheskikh nauk [Shadow Economy in the System of Threats to the Economic Safety of the Country: Factors, Evolution, Directions of Counteraction : specialty 08.00.05 "Economics and Management of National Economy (by branches and spheres of activity, including: economics, organization and management of enterprises, industries, complexes; innovation management; regional economics; logistics; labor economics; economy of population and demography; economics of nature management; economy of business; marketing; management; pricing; economic safety; standardization and product quality management; land management; recreation and tourism)": thesis for the of Doctor of Economics degree (in Russian).
- [5] Goncharuk A.V. Ispol'zovanie tekhnologii blokchejn dlya organizacii cepi postavok oborudovaniya i yadernogo topliva na AES [Using Blockchain Technology to Organize the Supply Chain of Equipment and Nuclear Fuel at Nuclear Power Plants], Energetik [Energy Specialist], 2018, No. 12, pp. 32-34 (in Russian).
- [6] Distributed cloud, AI engineering, cybersecurity mesh and composable business drive some of the top trends for 2021, <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-strategic-technology-trends-for-2021> (reference date: 06.12.2022) (in English).
- [7] Bulavin V.F. PLM-strategiya v melkoserijnom proizvodstve mashinostroitel'noj otrasli [PLM-Strategy in Small-Scale Production of Mechanical Engineering Industry], Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya: Mashinostroenie [News of Higher Educational Institutions. Series: Mechanical Engineering], 2018, No. 8, pp. 37-49 (in Russian).
- [8] Kazakova S.A., Bulavin V.F. Kompleksnaya cifrovizaciya podgotovki mashinostroitel'nogo proizvodstva [Comprehensive Digitalization of Machine-Building Production Preparation], Vestnik Vologodskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the Vologda State University], 2019, No. 1(3), pp. 44-47 (in Russian).
- [9] Kazakova S.A. CAD/SAPP-tekhnologii v mashinostroitel'nom proizvodstve [CAD/CAP Technologies in Mechanical Engineering], Nauka i sovremennost' 2018: materialy Mezhdunarodnoj XXXV nauchnoj konferencii [Science and Modernity 2018: Proceedings of the International XXXV Scientific Conference]. Moscow: ENO, 2018, Part 1, No. 1(35), pp. 70-73 (in Russian).
- [10] Itogi deyatel'nosti AO «Atomenergomash» za 2019 g. [JSC Atomenergomash Activity Results for 2019], <https://aem-group.ru/mediacenter/herald/2019/?ysclid=ld4iojrf67766699665> (accessed 12/06/2022) (in Russian).
- [11] Itogi deyatel'nosti AO «Atomenergomash» za 2020 g. [JSC Atomenergomash Activity Results for 2020], <https://aem-group.ru/mediacenter/news/opublikovanyi-otchetnyie-materialyi-za-2020-g.html?ysclid=ld4ip2w87077608085> accessed 12/06/2022) (in Russian).
- [12] Itogi deyatel'nosti AO «Atomenergomash» za 2021 g. [JSC Atomenergomash Activity Results for 2021] https://report.rosatom.ru/go/2021/aem_2021.pdf (accessed 12/06/2022) (in Russian).
- [13] Mozhet, luchshe pro reactor [Maybe Better about the Reactor], Vestnik AEM 2.0 [Bulletin of Nuclear Power Engineering 2.0], 2022, No. 5, <https://vestnik-aem.ru/upload/iblock/bd0/u22z4ricrdytwi3egzbxbpbhdrq6v172.pdf> (accessed 11/30/2022) (in Russian).
- [14] Volkov V. Raschety v usloviyah neopredelennosti [Calculations under Uncertainty], Vestnik AEM 2.0 [Bulletin of Nuclear Power Engineering 2.0], 2022, No. 2, <https://vestnik->

aem.ru/upload/iblock/c3d/zpaw207f8xelbntkdq8uol6jeiwprvj.pdf (accessed 11/30/2022)
(in Russian).

- [15] Svetloe cifrovoe budushchee atomnogo mashinostroeniya [Bright Digital Future for Nuclear Engineering], <https://spec.tass.ru/aemtech/elementy-tsifrovogo-zavoda> (accessed 12/06/2022) (in Russian).

Digital Trends in Strategic Development of Nuclear Power Engineering Enterprises

© 2023 Maria V. Golovko¹, Alexander N. Setrakov², Svetlana V. Volgina³,
Vladimir G. Tkachev⁴

¹ I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Kalinin St. 13, Krasnodar, Russia 350044

² Volgodonsk Branch of the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education «Rostov Law Institute of the Russian Ministry of Internal Affairs», Stepnaya St., 40, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360

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

¹ golovko178@mail.ru, ORCID iD: 0000-0002-4835-9800, WoS ResearcherID: J-2461-2016

² aleksandr-maior@inbox.ru, ORCID iD: 0000-0001-5599-440X, WoS ResearcherID: AAP-73782020

³ SVVolgina@mephi.ru, ORCID iD: 0000-0003-3425-8627

⁴ VGTkachev@mephi.ru

Received by the editorial office on 12/09/2022

After revision on 02/10/2023

Accepted for publication 02/21/2023

Abstract. This article substantiates the benefits of digitalization for the strategic development of industrial enterprises. The main directions of digital transformation of all business processes are defined. The experience and key results of the technological development strategy of the mechanical engineering division of SC "Rosatom" and the specifics of the nuclear power industry as a management object are considered and presented.

Keywords: digital technologies, nuclear power engineering, industrial enterprises, economic efficiency, JSC Atomenergomash, nuclear power, Rosatom State Corporation, nuclear power plants.

For citation: Golovko M.V., Setrakov A.N., Volgina S.V., Tkachev V.G. Digital Trends in Strategic Development of Nuclear Power Engineering Enterprises // Global Nuclear Safety. 2023. No. 1(46). P. 104-115 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2023-01-09>.

AUTHOR INDEX

<i>Abidova E.A.</i>	67
<i>Arkadov G.V.</i>	54
<i>Arsentyev S.V.</i>	92
<i>Elokhin A.P.</i>	5
<i>Golovko M.V.</i>	104
<i>Gubeladze A.R.</i>	14
<i>Gubeladze O.A.</i>	14
<i>Ivanyi M.B.</i>	36
<i>Khlobystov V.M.</i>	23
<i>Kirkin A.M.</i>	23
<i>Kotsoev K.I.</i>	54
<i>Kuryndin A.V.</i>	23
<i>Lobarev A.L.</i>	79
<i>Majidov A.I.</i>	5
<i>Plotnikov D.A.</i>	79
<i>Popov V.M.</i>	67
<i>Povarov P.V.</i>	67
<i>Prytkova D.A.</i>	67
<i>Pugacheva O.Yu.</i>	67
<i>Rakhmatulin A.B.</i>	5
<i>Rodionov I.A.</i>	5
<i>Schukin N.V.</i>	79
<i>Setrakov A.N.</i>	104
<i>Shcherbakov A.A.</i>	36
<i>Shcherban A.S.</i>	36
<i>Shustov A.E.</i>	5
<i>Sinegribov S.V.</i>	23
<i>Smirnov A.O.</i>	23
<i>Solovyov D.A.</i>	79
<i>Surin V.I.</i>	36
<i>Tanash H.A.</i>	79
<i>Tkachev V.G.</i>	104
<i>Tomilin S.A.</i>	36
<i>Trykova I.V.</i>	54
<i>Ulin S.E.</i>	5
<i>Volgina S.V.</i>	104
<i>Zhidkov M.E.</i>	36
<i>Zimin V.G.</i>	79
<i>Zvyagincev D.V.</i>	54

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

<i>Абидова Е.А.</i>	67
<i>Аркадов Г.В.</i>	54
<i>Арсентьев С.В.</i>	92
<i>Волгина С.В.</i>	104
<i>Головко М.В.</i>	104
<i>Губеладзе А.Р.</i>	14
<i>Губеладзе О.А.</i>	14
<i>Елохин А.П.</i>	5
<i>Жидков М.Е.</i>	36
<i>Звягинцев Д.В.</i>	54
<i>Зимин В.Г.</i>	79
<i>Иваний М.Б.</i>	36
<i>Киркин А.М.</i>	23
<i>Коцоев К.И.</i>	54
<i>Курындин А.В.</i>	23
<i>Лобарев А.Л.</i>	79
<i>Маджидов А.И.</i>	5
<i>Плотников Д.А.</i>	79
<i>Поваров П.В.</i>	67
<i>Попов В.М.</i>	67
<i>Прыткова Д.А.</i>	67
<i>Пугачева О.Ю.</i>	67
<i>Рахматулин А.Б.</i>	5
<i>Родионов И.А.</i>	5
<i>Сетраков А.Н.</i>	104
<i>Синегрибов С.В.</i>	23
<i>Смирнов А.О.</i>	23
<i>Соловьёв Д.А.</i>	79
<i>Сури́н В.И.</i>	36
<i>Танаш Х.А.</i>	79
<i>Ткачев В.Г.</i>	104
<i>Томилин С.А.</i>	36
<i>Трыкова И.В.</i>	54
<i>Улин С.Е.</i>	5
<i>Хлобыстов В.М.</i>	23
<i>Шустов А.Е.</i>	5
<i>Щербаков А.А.</i>	36
<i>Щербань А.С.</i>	36
<i>Щукин Н.В.</i>	79

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.

You should post an article on the elpub platform <https://glonucsec.elpub.ru/jour/index> and provide the following materials by e-mail oni-viti@mephi.ru in order your article to be accepted in the journal:

- 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 dismantle during NPP unit taking out of operation], Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global nuclear safety], 2014, no. 1(10), pp. 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, no. 1, pp. 32-38, http://e-notabene.ru/pp/article_22498.html (in Russian).

For books:

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

For web-resources:

- [4] Strategia razvitiya transportnogo kompleksa Rostovskoy oblasti do 2030 goda [Development strategy of a transport complex of the Rostov region till 2030]. Officialnij sait Ministerstva transporta Rostovskoy oblasti [Official site of the Transport Ministry of Rostov region], 2015, <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 izlucheniem [Research of features of initiation are photosensitive explosive structures incoherent radiation] [Works of the International conference «16 Haritonov's scientific readings»]. Sarov. FGUP «RFYaTs-VNIIEF» [Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics], 2014, pp. 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, Volgogradsk, Lenin Street, 73/94

Editorial office of «Global Nuclear Safety» journal

E-mail: oni-viti@mephi.ru

Tel: +79185041937, Tatyana Popova

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 разместить статью на платформе elpub – <https://glonucsec.elpub.ru/jour/index> – и по электронной почте oni-viti@mephi.ru предоставить следующие материалы:

- 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.: +79185041937, Попова Татьяна Сергеевна