

- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)  
2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки),  
2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность (технические науки),  
5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономические науки)

**Главный редактор:**

**Михаил Николаевич Стриханов**, доктор физ.-мат. наук, профессор, НИЯУ МИФИ, Российская Федерация

**Заместитель главного редактора:**

**Валентина Анатольевна Руденко**, доктор соц. наук, профессор, НИЯУ МИФИ, Российская Федерация

**Выпускающий редактор:**

**Надежда Ивановна Лобковская**, канд. филос. наук, НИЯУ МИФИ, Российская Федерация

**Редакционная коллегия:**

**Владимир Петрович Поваров**, доктор техн. наук, Нововоронежская АЭС, Российская Федерация

**Мажын Канапинович Скаков**, доктор физ.-мат. наук, профессор, Восточно-Казахстанский университет, Казахстан

**Валентин Ефимович Шукшунов**, доктор техн. наук, профессор, Центр тренажеростроения и подготовки персонала, Российская Федерация

**Лю Дамин**, профессор, Китайский институт ядерной энергетики, Китай

**Александр Викторович Чернов**, доктор техн. наук, профессор, НИЯУ МИФИ, Российская Федерация

**Александр Проккопьевич Елохин**, доктор техн. наук, профессор, НИЯУ МИФИ, Российская Федерация

**Юрий Иванович Пимшин**, доктор техн. наук, профессор, Донской государственный технический университет, Российская Федерация

**Абдель-Монем Мохамед Эл-Батахи**, Центральный металлургический научно-исследовательский институт, Египет

**Валерий Вольфович Кривин**, доктор техн. наук, профессор, НИЯУ МИФИ, Российская Федерация

**Виктор Иванович Ратушный**, доктор физ.-мат. наук, профессор, НИЯУ МИФИ, Российская Федерация

**Андрей Александрович Сальников**, канд. техн. наук, Ростовская АЭС, Российская Федерация

**Александр Аркадьевич Лапкис**, канд. техн. наук, НИЯУ МИФИ, Российская Федерация

**Сергей Эдуардович Гокк**, PhD в области техн. наук, Институт производственных систем и технологий конструирования ИПК Общества Фраунгофера, Германия

**Юлий Львович Чигиринский**, доктор техн. наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет, Российская Федерация

**Александр Евгеньевич Зверовщиков**, доктор техн. наук, доцент, Пензенский государственный университет, Российская Федерация

**Александр Рональдович Ингеманссон**, доктор техн. наук, АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады», Российская Федерация

**Мария Владимировна Головки**, доктор экон. наук, Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Российская Федерация

**Наталья Дмитриевна Родионова**, доктор экон. наук, Ростовский государственный экономический университет (РИНХ), Российская Федерация

**Наталья Михайловна Фоменко**, доктор экон. наук, РЭУ им. Г.В. Плеханова, Российская Федерация

**Александр Николаевич Шилин**, доктор техн. наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет, Российская Федерация

**Компьютерная верстка:**

**Ольга Юревна Васильева**, инженер издательско-полиграфического сектора, ВИТИ НИЯУ МИФИ, Российская Федерация

**Регистрация СМИ**

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций 11 ноября 2011 года (Свидетельство ПИ № ФС77-47155 от 3.11.2011 г. – печатное издание). Первый номер журнала вышел в декабре 2011 года

**Периодичность**

4 номера в год

**Учредитель и издатель**

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация

**Типография**

ВИТИ НИЯУ МИФИ, 347360, Россия, Ростовская обл., г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94

**Адрес учредителя и издателя**

115409, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31

**Сайт**

<https://glonucsec.elpub.ru>

**Тираж**

100 экз.

**Распространение**

Распространяется бесплатно

**Дата выхода в свет:**

23.03.2026

Знаком информационной продукции не маркируется



National Research Nuclear University MEPhI

# Nuclear Safety

ISSN 2305-414X (Print), ISSN 2499-9733 (Online)

Vol. 16, No. 1, 2026

**Editor-in-Chief:**

**Mikhail N. Strikhanov**, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, MEPhI, Russian Federation

**Deputy Editor-in-Chief:**

**Valentina A. Rudenko**, Dr. Sci. (Soc.), Professor, MEPhI, Russian Federation

**Executive Editor:**

**Nadezhda I. Lobkovskaya**, Cand. Sci. (Philos.), MEPhI, Russian Federation

**Editorial Staff:**

**Vladimir P. Povarov**, Dr. Sci. (Eng.), Novovoronezh NPP, Russian Federation

**Mazhin K. Skakov**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Kazakhstan

**Valentin E. Shukshunov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, LLC «Simulator Center and Staff Training», Russian Federation

**Liu Daming**, Professor, Chinese nuclear power institute, CIAE, China

**Alexandr V. Chernov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, MEPhI, Russian Federation

**Alexandr P. Elokhin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, MEPhI, Russian Federation

**Yuriy I. Pimshin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University, Russian Federation

**Abdel-Monem Mohamed EI-Batahy**, Dr. Philos. Central Metallurgical Research and Development Institute, Egypt

**Valery V. Krivin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, MEPhI, Russian Federation

**Viktor I. Ratushny**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, MEPhI, Russian Federation

**Andrey A. Salnikov**, Cand. Sci. (Eng.), Rostov NPP, Russian Federation

**Aleksandr A. Lapkis**, Cand. Sci. (Eng.), MEPhI, Russian Federation

**Sergei E. Gook**, PhD, Fraunhofer Institute for Production Systems and Design Technology IPK, Germany

**Yuliy L. Chigirinsky**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Volgograd State Technical University, Russian Federation

**Alexander E. Zverovshchikov**, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor Penza State University, Russian Federation

**Alexander R. Ingemansson**, Dr. Sci. (Eng.), JSC FNPC «Titan-Barricades», Russian Federation

**Mariya V. Golovko**, Dr. Sci. (Econ.), Kuban SAU, Russian Federation

**Natalia D. Rodionova**, Dr. Sci. (Econ.), Rostov State University of Economics (RINH), Russian Federation

**Natalia M. Fomenko**, Dr. Sci. (Econ.), Plekhanov Russian University of Economics, Russian Federation

**Alexander N. Shilin**, Dr. Sci. (Eng.), Volgograd State Technical University, Russian Federation

**Computer layout:**

**Olga Yu. Vasileva**, Engineer of Publishing and Printing Sector, VETI NRNU MEPhI, Russian Federation

Founded in November, 2011

Publication Frequency

Founder and Publisher

Editorial address

Printing house

Website

The circulation is

Subscription

Signed for printing:

It is not marked with an informational product sign

Reg. № FS77-47155, November, 3 2011

Quarterly

National Research Nuclear University MEPhI

Kashirskoe shosse 31, Moscow, 115409, Russian Federation

VETI NRNU MEPhI, Lenin Street, 73/94, Rostov region, Volgodonsk, 347360, Russian Federation

<https://glonucsec.elpub.ru>

100 copies

Free distribution

23.03.2026



Moscow

National Research Nuclear University MEPhI, 2026

## СОДЕРЖАНИЕ

Том 16, № 1 (58), 2026

### ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<b>Методический подход к установлению пределов и контролю мощности критических стендов по условиям обеспечения радиационной безопасности</b> <i>А.Г. Васяткин, А.В. Белин, М.А. Соснин, А.А. Молодцов, М.А. Камнев</i> .....	5
<b>Алгоритм прогнозирования выработки объекта генерации возобновляемой энергетики</b> <i>А.Н. Ленских, Е.Ю. Алтунина, А.А. Поволоцкая, А.Е. Дембицкий</i> .....	15

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

<b>Реализация инструментов интерактивного скрытия полупространства моделируемой области</b> <i>А.Э. Копейкин, М.Г. Кузнецов</i> .....	23
<b>Опыт применения размагничивания крупногабаритных деталей для стабилизации сварочной дуги</b> <i>М.Е. Жидков, П.А. Меженский, А.Г. Карташов, С.А. Томили</i> .....	34
<b>Оценка возможностей атомно-силовой микроскопии в исследовании никелида титана</b> <i>А.П. Дмитриева, М.Э. Бузовера</i> .....	44

### ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

<b>Автоматизированный аудит согласованности паспортов процессов интегрированной системы управления АЭС</b> <i>А.А. Мозговой, О.В. Подоляк</i> .....	52
<b>Моделирование режимов работы турбоустановки при продлении кампании энергоблока ВВЭР-1000</b> <i>Г.Н. Никитась, А.А. Лапкис, Д.А. Озерный</i> .....	61
<b>Опыт модернизации системы автоматического регулирования турбины К-1200-6,8/50</b> <i>В.П. Поваров, Д.Е. Усачев, А.А. Самодеев</i> .....	69

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

<b>Влияние особенностей национального менталитета на культуру безопасности атомной отрасли Республики Беларусь</b> <i>В.П. Давлетбаев, А.В. Кузьмин, С.В. Шило, О.А. Макарова, Д.И. Плюто</i> .....	78
<b>Динамика снижения производственного травматизма и экономическая эффективность мер промышленной безопасности в Республике Казахстан на примере АО «Ульбинский металлургический завод» АО «НАК «Казатомпром»</b> <i>Т.Ш. Идрисов, М.В. Коптелов</i> .....	90
<b>Механизмы габитуализации культуры безопасности в сети предприятий – маркетинговых партнеров атомной отрасли</b> <i>М.В. Головки, В.А. Руденко, М.В. Рябышев, А.В. Анцибор</i> .....	99
<b>Развитие альтернативных источников энергии Африки в контексте зеленой повестки и экономического развития региона</b> <i>Т.С. Попова, В.В. Беспалько</i> .....	110

Авторский указатель номера 1 (58), 2026.....	119
--	-----

## CONTENTS

Vol. 16, No 1, 2026

---

### NUCLEAR, RADIATION AND ENVIRONMENTAL SAFETY

<b>Methodical approach to setting limits and monitoring the power of critical test facility according to radiation safety conditions</b> <i>A.G. Vasyatkin, A.V. Belin, M.A. Sosnin, A.A. Molodtsov, M.A. Kamnev</i> .....	5
<b>Forecasting algorithm of renewable energy generation facility production</b> <i>A.N. Lenskih, E.Yu. Altunina, A.A. Povolotskaya, A.E. Dembitsky</i> .....	15

---

### DESIGN, MANUFACTURING AND COMMISSIONING OF NUCLEAR INDUSTRY EQUIPMENT

<b>Implementation of interactive tools of concealing the half-space of the modeled area</b> <i>A.E. Kopeikin, M.G. Kuznetsov</i> .....	23
<b>Experience in degaussing large-sized parts to stabilize the welding arc</b> <i>M.E. Zhidkov, P.A. Mezhenky, A.G. Kartashov, S.A. Tomilin</i> .....	34
<b>Evaluation of atomic microscopy potential in the study of titanium nickellides</b> <i>A.P. Dmitrieva, M.E. Buzoverya</i> .....	44

---

### OPERATION OF FACILITIES NUCLEAR INDUSTRY

<b>Automated audit of the consistency of NPP integrated management system process passports</b> <i>A.A. Mozgovi, O.V. Podolyak</i> .....	52
<b>Modeling of turbine operating modes of the stretch-out operation for VVER-1000 power unit</b> <i>G.N. Nikitas, A.A. Lapkis, D.A. Ozerny</i> .....	61
<b>Experience in upgrading the automatic control system of the K-1200-6.8/50 turbine</b> <i>V.P. Povarov, D.E. Usachev, A.A. Samodeenko</i> .....	69

---

### SAFETY CULTURE AND SOCIO-ECONOMIC ASPECTS DEVELOPMENT PLACEMENT TERRITORIES NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

<b>The influence of national mentalities on the safety culture of the nuclear industry in the Republic of Belarus</b> <i>V.P. Dauletbayeu, A.V. Kuzmin, S.V. Shyla, V.A. Makarava, D.I. Pliuta</i> .....	78
<b>The dynamics of the decline in work-related injuries and the economic efficiency of industrial safety measures in the Republic of Kazakhstan, using the example of Ulba Metallurgical Plant JSC, Kazatomprom JSC</b> <i>T.Sh. Idrisov, M.V. Koptelov</i> .....	90
<b>Habitualization mechanisms of safety culture in the network of the nuclear industry's marketing partners</b> <i>M.V. Golovko, V.A. Rudenko, M.V. Ryabyshev, A.V. Antsbior</i> .....	99
<b>Development of alternative energy sources in Africa in the context of the region green agenda and economic development</b> <i>T.S. Popova, V.V. Bepalko</i> .....	110

---

Author Index of 1, 2026.....	119
------------------------------	-----

---

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

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-01>

УДК 539.16

EDN YJDFZH

Оригинальная статья / Original paper



**Методический подход к установлению пределов и контролю мощности критических стенов по условиям обеспечения радиационной безопасности**

**А.Г. Васяткин** ✉, **А.В. Белин**, **М.А. Соснин**, **А.А. Молодцов**, **М.А. Камнев**  
АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Нижегородская обл., Российская Федерация  
✉ [dep105@okbm.nnov.ru](mailto:dep105@okbm.nnov.ru)

**Аннотация.** В статье рассмотрены особенности установления эксплуатационных пределов и пределов безопасной эксплуатации по мощности для критических стенов при нейтронно-физических испытаниях активных зон судовых ЯЭУ. На основе аспектного анализа показано, что в диапазоне мощностей, характерных для критическихборок, тепловой и конструкционный аспекты не определяют выбор предельной мощности, тогда как решающим становится радиационный аспект. Проанализирована связь нейтронной мощности с измеряемыми нейтронно-физическими характеристиками и показаниями ионизационных камер, а также выделены два критических с точки зрения радиационной безопасности этапа: работа критической сборки на мощности и обращение персонала с ТВС после извлечения. Показано, что при постоянной нейтронной мощности измеряемая системой радиационного контроля мощность дозы в помещении критического стенов может оставаться практически неизменной, поскольку определяется преимущественно мгновенными компонентами излучения и биологической защитой. Одновременно дозовые характеристики ТВС после завершения облучения формируются накопленной активностью продуктов деления и активации и зависят от предыстории режима. Обосновано, что предельно допустимые режимы работы целесообразно назначать как допустимые комбинации «мощность – время работы», привязанные к прогнозируемой мощности дозы от ТВС и ограничениям для транспортно-упаковочных комплектов. Для оперативного прогнозирования дозовых характеристик предложено использование цифрового двойника критической сборки, реализующего расчет мощности дозы от ТВС по истории облучения. Методика позволяет связать уставки и режимы испытаний с объективными критериями радиационной безопасности, снизить неопределенность на этапе извлечения ТВС и обеспечить требуемую точность нейтронно-физических измерений при расширении номенклатуры испытываемых активных зон.

**Ключевые слова:** критический стенов, ТВС, нейтронная мощность, мощность дозы, цифровой двойник

**Для цитирования:** Васяткин А.Г., Белин А.В., Соснин М.А., Молодцов А.А., Камнев М.А. Методический подход к установлению пределов и контролю мощности критических стенов по условиям обеспечения радиационной безопасности. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(1):5–14. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-01>

**For citation:** Vasyatkin A.G., Belin A.V., Sosnin M.A., Molodtsov A.A., Kamnev M.A. Methodical approach to setting limits and monitoring the power of critical test facility according to radiation safety conditions. *Nuclear Safety*. 2026;16(1):5–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-01>

**Methodical approach to setting limits and monitoring the power of critical test facility according to radiation safety conditions**

**Anatolii G. Vasyatkin** ✉, **Aleksei V. Belin**, **Mikhail A. Sosnin**, **Anton A. Molodtsov**,  
**Mikhail A. Kamnev**  
*Afrikantov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod region, Russian Federation*  
✉ [dep105@okbm.nnov.ru](mailto:dep105@okbm.nnov.ru)

**Abstract.** The article considers the specifics of establishing operating limits and safe operating limits in terms of power for critical test facilities during neutron-physical tests of propulsion reactor cores. Based on an aspect-oriented analysis, it is shown that within the power range typical of critical assemblies, the thermal and structural aspects do not determine the choice of the limiting power, whereas the radiation aspect becomes decisive. The relationship between neutron power, the measured neutronic characteristics, and the readings of ionization chambers is analyzed, and two stages that are critical from the standpoint of radiation safety are identified: operation of the critical assembly at power and personnel handling of fuel assemblies after their removal. It is shown that at constant neutron power, the dose rate measured by the radiation monitoring system in the critical facility room may remain nearly unchanged as it is governed primarily by prompt radiation components and biological shielding. At the same time, the dose-rate characteristics of fuel assemblies after irradiation are determined by the accumulated activity of fission products and activation products and depend on the irradiation history. It is substantiated that the maximum permissible operating conditions should be defined as allowable «power–operating time» combinations linked to the predicted dose rate from fuel assemblies and to the limits applicable to transport packages. The use of a digital twin of the critical assembly is proposed for the prompt prediction of dose-rate characteristics, which calculates the dose rate from fuel assemblies based on the irradiation history. The methodology makes it possible to relate protection setpoints and test regimes to objective radiation safety criteria, reduce uncertainty at the stage of fuel-assembly removal, and ensure the required accuracy of neutron-physical measurements when expanding the range of tested core types.

**Keywords:** critical test facility, fuel assembly, neutron power, dose rate, digital twin

## Введение

Концептуальные технические решения судовых реакторных установок, разработанных в АО «ОКБМ Африкантов», позволили создать мощные и компактные ядерные энергетические установки (далее – ЯЭУ) с увеличенным интервалом между перезарядками [1]. Однако, ввиду необходимости постоянной готовности ввода ЯЭУ, компактности реакторной установки и отсутствия технических средств обращения с ядерным топливом на судах, активная зона относится к неремонтируемым одноразовым изделиям без возможности какого-либо вмешательства в ее характеристики в процессе эксплуатации. Эти решения накладывают ряд повышенных требований к процессам разработки и изготовления активной зоны.

Учитывая отсутствие возможности вмешательства в процесс выгорания ядерного топлива в активной зоне, многочисленные условия изменения параметров активной зоны (такие как изменение изотопного состава ядерного топлива, выгорание поглотителей, изменение эффектов реактивности) должны быть заранее спрогнозированы расчетными программными комплексами. Активные зоны перед загрузкой в реактор должны пройти всестороннюю проверку и оценку на соответствие проектным характеристикам. Для верификации расчетных комплексов и подтверждения стартовых нейтронно-физических характеристик все активные зо-

ны, разработанные в АО «ОКБМ Африкантов» и поставляющиеся на судовые ЯЭУ, проходят нейтронно-физические испытания на критических стендах [2].

В условиях критических стендов тепловыделяющие сборки (далее – ТВС) активной зоны загружаются в экспериментальные блоки, имитирующие конфигурацию активной зоны в реакторе ЯЭУ по расположению, отражателю, замедлителю, конфигурации рабочих органов компенсации реактивности и аварийной защиты (далее – критическая сборка).

Определение нейтронно-физических характеристик активной зоны осуществляется на низких уровнях нейтронной мощности в диапазоне от 0,1 до нескольких сотен ватт, необходимых для обеспечения требуемой точности измерения нейтронно-физических характеристик, и достаточных для дальнейшей работы с ТВС после испытаний персоналу без применения дистанционных устройств и защитных камер. После испытаний на критических стендах активная зона направляется на окончательную сборку и загрузку в реактор.

При испытаниях активных зон ЯЭУ диапазон мощности критических стендов ограничен проектными значениями максимально разрешенных мощностей (пределов безопасной эксплуатации по мощности), по которым устанавливаются уставки аварийной защиты в соответствии с требованиями нор-

мативных документов<sup>1,2</sup>. Однако подходы к установлению пределов и контролю мощности критических стенов отличаются от используемых в энергетических реакторах ввиду различных механизмов влияния мощности на условия обеспечения безопасности.

В статье предложен новый методический подход к установлению пределов и контролю мощности критических стенов при испытаниях активных зон ЯЭУ по условиям обеспечения радиационной безопасности.

### **Аспектный подход к нейтронной мощности критических стенов**

Основной характеристикой существующих ядерных установок является мощность, что нашло отражение и в нормативной документации по безопасности критических стенов, также называемых реакторами нулевой мощности. В соответствии с нормативными требованиями НП-049-17<sup>2</sup> эксплуатационным пределом и пределом безопасной эксплуатации критических стенов должна быть установлена тепловая мощность.

Анализ опыта эксплуатации ядерных установок выявил 3 аспекта установления предела безопасной эксплуатации по мощности:

- мощность как источник тепловыделения (тепловой аспект);
- мощность как источник накопления флюенса в конструкционных материалах (конструкционный аспект);
- мощность как источник ионизирующего излучения (радиационный аспект).

Тепловая мощность энергетических реакторов является основным параметром, по которому определяются эксплуатационные пределы и пределы безопасной эксплуатации. Ограничение мощности энергетических реакторов в первую очередь связано с теплотехнической надежностью активной зоны [3]. Превышение предела безопасной

эксплуатации по мощности может привести к расплавлению топливных элементов и нарушению барьера безопасности.

Другим фактором, ограничивающим мощность энергетических реакторов, является накопление флюенса ионизирующего излучения в конструкционных материалах. Воздействие высоких флюенсов ионизирующего излучения приводит к радиационно-стимулированному изменению структуры, а также элементного и фазового состава конструкционного материала и, как следствие, значительному изменению физических и механических свойств [4]. Это может привести к потере достаточной механической прочности, изменению конструктивной компоновки и потере физико-химических свойств основных узлов реактора. При достигнутых физико-механических свойствах конструкционных материалов большая мощность реактора может значительно ограничить ресурс важных элементов и привести к их отказу.

Ядерный реактор, работающий на мощности, является источником ионизирующего излучения. Поэтому особое внимание уделяется проектированию защиты от излучения активной зоны для обеспечения требований радиационной безопасности. Но, как правило, материалы и компоновка радиационной защиты подбираются под максимальную мощность реакторной установки, установленной с учетом теплового аспекта и проектных аварий [5]. То есть радиационный аспект для ЯЭУ является вторичным.

Особенностью критических стенов является малый уровень мощности (в диапазоне от 1 Вт до 5000 Вт по базе данных МАГАТЭ<sup>3</sup>), необходимый для проведения испытаний или исследований. Целями и задачами использования критических стенов, в соответствии с федеральными нормами и правилами НП-033-11<sup>4</sup>, являются исследования нейтронно-физических характеристик,

<sup>1</sup> НП-008-16. Правила ядерной безопасности критических стенов. – Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2016. – 36 с. – Режим доступа: <https://u.to/ONV2lg> (дата обращения: 30.09.2025).

<sup>2</sup> НП-049-17. Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности исследовательских ядерных установок. – Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2017. – 47 с. – Режим доступа: <https://u.to/R9V2lg> (дата обращения: 30.09.2025).

<sup>3</sup> The IAEA Research Reactor Database (RRDB). – Режим доступа: <https://nucleus.iaea.org/rddb/#/home> (дата обращения: 30.09.2025).

<sup>4</sup> НП-033-11. Общие положения обеспечения безопасности исследовательских ядерных установок. – Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2011. – 43 с. – Режим доступа: [https://docs.secncrs.ru/documents/nps/%D0%9D%D0%9F-033-11/%D0%9D%D0%9F-033-11\\_conv.pdf](https://docs.secncrs.ru/documents/nps/%D0%9D%D0%9F-033-11/%D0%9D%D0%9F-033-11_conv.pdf) (дата обращения: 30.09.2025).

размножающих нейтроны среды на мощности, не требующей принудительного охлаждения среды и не оказывающей влияние на ее нейтронно-физические характеристики.

Малый уровень мощности позволяет эксплуатировать критические стенды без сложнейших систем теплоотвода и радиационной защиты, присущих ЯЭУ. А также дает возможность работать персоналу с ТВС, без технических средств радиационной защиты. Из самого определения критического стенда следует, что тепловой и конструкционный аспекты мощности не оказывают влияния на выбор предела безопасной эксплуатации по мощности. Поэтому из рассмотренных аспектов мощности ядерных установок на установление предела безопасной эксплуатации по мощности критических стендов, определяющее влияние оказывает радиационный аспект и необходимость обеспечения радиационной безопасности. Причем обеспечение радиационной безопасности требуется не только на этапах эксплуатации критической сборки на мощности, но также на этапах обращения с ТВС вне критической сборки после работы на мощности.

Разнообразие критических стендов по назначению, конструкционным особенностям и технологическим процессам обращения с ТВС требует индивидуального подхода к установлению пределов и контролю мощности по условиям обеспечения радиационной безопасности.

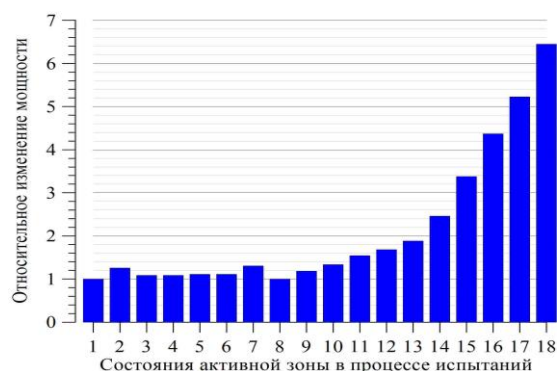
### Нейтронная мощность и измеряемые характеристики активных зон

Прежде чем рассмотреть радиационный аспект установления пределов по мощности критических стендов, рассмотрим взаимосвязь нейтронной мощности и измеряемых нейтронно-физических характеристик активных зон.

Определение нейтронно-физических характеристик активных зон на критических стендах, таких как эффективность РО АЗ, дифференциальная эффективность РО КГ и т.д., осуществляется дифференциальными методами с использованием реактиметра. Реактиметр – средство измерения, на вход которого поступают сигналы от одного или нескольких нейтронных детекторов (как

правило, это ток от ионизационных камер), и обрабатываются по алгоритму, реализующему непрерывное синхронное решение обращенного уравнения кинетики в точечной модели. Ионизационные камеры регистрируют нейтроны утечки, количество которых зависит не только от нейтронной мощности, но и от пространственного распределения потока нейтронов в критической сборке.

Испытания активной зоны на критическом стенде предполагают анализ различных ее конфигураций, характеризующихся существенным различием в распределении плотности потока нейтронов. Для обеспечения сопоставимой точности измерений реактивности критически важно поддерживать идентичный диапазон изменений тока в ионизационных камерах во всех исследуемых конфигурациях. Следует отметить, что при одинаковых показаниях ионизационных камер различные конфигурации активной зоны могут генерировать неодинаковую нейтронную мощность. Это наглядно демонстрируется на рисунке 1, где представлено относительное изменение нейтронной мощности критической сборки с активной зоной судовой ЯЭУ для 18 различных конфигураций.



**Рисунок 1.** Относительное изменение мощности критической сборки в различных конфигурациях активной зоны при одинаковом токе ионизационных камер

**Figure 1.** Relative change in the power of the critical assembly in different configurations with the same current of the ionization chambers

Указанные конфигурации отличаются как положением рабочих органов СУЗ, так и количеством ТВС в критической сборке.

Минимальный ток ионизационных камер ограничен наличием внутренних источников нейтронов, не связанных с делением ядерного

топлива, и фоновыми составляющими тока ионизационных камер, вносящих существенный вклад в погрешность вычисления реактивности. Так, для измерения реактивности с погрешностью не более  $\pm 0,005 \beta$  с использованием 6-ти ионизационных камер КНК-56М и реактиметра ЦВР-11, используемых на критических стендах АО «ОКБМ Африкантов», минимальный ток измерения реактивности должен быть не ниже  $10^{-8}$  А. Максимальный ток ионизационных камер для измерений должен быть достаточным для проведения дифференциальных экспериментов и, как правило, составлять около  $5 \cdot 10^{-7}$  А. Фактически максимальный ток ограничен уставками аварийной защиты по мощности.

На первый взгляд уставки аварийной защиты по мощности следует устанавливать по максимально реализуемой мощности в процессе испытаний. Однако применение такого подхода без ограничения времени работы на мощности может привести к значительному превышению контролируемых параметров радиационной безопасности. Поэтому в процессе испытаний активной зоны целесообразно контролировать не столько нейтронную мощность, сколько параметры радиационной безопасности, поскольку они являются более информативными для персонала и объективными для оценки соблюдения требований радиационной безопасности.

### **Радиационный аспект при испытаниях активных зон ЯЭУ на критических стендах**

Основным фактором, ограничивающим сверху мощность критической сборки при нейтронно-физических испытаниях, является ограничение радиационного воздействия на работников (персонал), население и окружающую среду установленными пределами в соответствии с нормативным документом НРБ-99/2009<sup>5</sup>.

С точки зрения радиационного воздействия на персонал, можно выделить 2 вида работ на критических стендах:

- 1) обращение персонала с ТВС;
- 2) режим пуска и работы на мощности критической сборки.

При обращении персонала с ТВС производятся распаковка ТВС из ТУК, в которых они прибыли из завода изготовителя активной зоны, и расстановка ТВС в хранилища. После распаковки ТВС загружаются в критическую сборку. После окончания экспериментов с активной зоной в режимах пуска и работы на мощности, ТВС извлекаются из критической сборки и устанавливаются в хранилища. Далее ТВС подготавливаются к упаковке в ТУК путем их промывки и осушки. И окончательной операцией обращения с ТВС является их упаковка в те же ТУК, в которых они прибыли на испытания. Все операции с ТВС производятся персоналом вручную, поэтому радиационное воздействие на персонал определяется ионизирующим излучением от ТВС.

В режимах пуска и работы на мощности критическая сборка с полностью загруженной активной зоной выводится в первое критическое состояние. Далее проводятся эксперименты по определению нейтронно-физических характеристик активной зоны. При работе критической сборки на мощности, персонал находится в пультовом помещении, огражденном от критической сборки биологической защитой. Радиационное воздействие на персонал определяется ионизирующим излучением от критической сборки.

Соответственно основными критериями безопасности проведения нейтронно-физических испытаний будут являться:

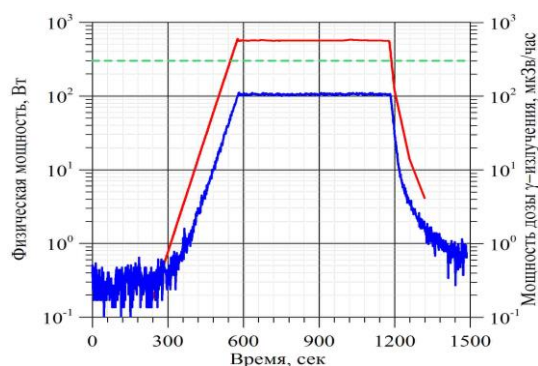
- 1) радиационная обстановка вокруг критической сборки в процессе режима работы на мощности;
- 2) дозовые характеристики ТВС при обращении с ними вне критической сборки после испытаний.

Первый критерий безопасности можно обеспечить соответствующей биологической защитой и ограничением нейтронной мощности, а контроль радиационной обстановки можно оперативно осуществлять средствами дозиметрического контроля. Определяющий

<sup>5</sup> Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009». Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 7 июля 2009 г. № 47. – Москва, 2009. – Режим доступа: <https://u.to/VtV2Ig> (дата обращения: 30.09.2025).

вклад в радиационную обстановку вносят мгновенные нейтроны деления, мгновенные фотоны, захватное  $\gamma$ -излучение и  $\gamma$ -излучение при неупругом рассеянии быстрых нейтронов, которые пропорциональны мощности критической сборки в рассматриваемый период. Запаздывающие фотоны, интенсивность которых зависит не только от мощности, но и от режимов работы критической сборки в предыдущие периоды, вклада в радиационную обстановку не вносят и средствами дозиметрического контроля не обнаруживаются.

Для иллюстрации этого на рисунке 2 представлены результаты измерения мощности дозы  $\gamma$ -излучения при испытаниях активной зоны в режиме активации на критическом стенде на максимально разрешенной мощности  $\sim 600$  Вт в течение 10 минут.



**Рисунок 2.** Измеренные значения нейтронной мощности и мощности дозы  $\gamma$ -излучения в режиме активации на критическом стенде при испытаниях активной зоны: — нейтронная мощность; — мощность дозы  $\gamma$ -излучения в боксе критического стенда; — контрольный уровень по мощности дозы  $\gamma$ -излучения в боксе критического стенда

**Figure 2.** Measured values of neutron power and dose rate of  $\gamma$ -radiation in the activation mode at the critical test facility during core tests: — neutron power; —  $\gamma$ -radiation dose rate in the critical test facility box; — reference level by  $\gamma$ -radiation dose rate in the critical test facility box

Как видно из рисунка 2, на протяжении всего времени активации при постоянной нейтронной мощности измеряемые системой радиационного контроля мощности доз  $\gamma$ -излучения оставались постоянными. Это объясняется более высокой средней энергией мгновенных фотонов, способных пройти через конструкционные материалы критической сборки и строительные сооружения.

Запаздывающие фотоны, испускаемые продуктами деления, имеют меньшую среднюю энергию и в основном поглощаются в конструкционных материалах критической сборки [5]. Также из рисунка 2 видно, что измеренные мощности дозы были меньше установленных контрольных уровней в три раза, что говорит о достаточном запасе защиты от ионизирующего излучения и о практической возможности увеличить нейтронную мощность без ухудшения радиационной обстановки вокруг критической сборки.

Второй критерий безопасности будет обуславливаться только запаздывающим фотонным излучением и активационным  $\gamma$ -излучением, зависящими от концентрации радиоактивных изотопов, накопленных за предысторию работы критической сборки на мощности. Момент извлечения ТВС после работы критической сборки на мощности является критически важным с точки зрения радиационной безопасности. Именно в этот момент присутствует фактор неопределенности в мощности дозы от ТВС, так как проконтролировать ее с использованием измерительных средств физически невозможно до момента извлечения ТВС из критической сборки. Кроме того, имеются ограничения мощности дозы  $\gamma$ -излучения от транспортных упаковочных комплектов, в которые ТВС упаковываются после испытаний для отправки на завод-изготовитель. Для транспортирования ТВС используются транспортные упаковочные комплекты, относящиеся в соответствии с требованиями <sup>6</sup> к упаковкам типа А с делящимися материалами, не относящимися к особому виду. В соответствии с требованиями НП-053-16 на ТУК устанавливаются требования по ограничению мощности дозы от поверхности упаковки. Конструктив ТУК не имеет биологической защиты, поэтому требования по ограничению мощности дозы должны обеспечиваться дозовыми характеристиками ТВС после испытаний.

<sup>6</sup> НП-053-16. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов. – Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2016. – 111 с. – Режим доступа: <https://clc.li/jrqqS> (дата обращения: 30.09.2025).

Обеспечить второй критерий безопасности возможно только ограничениями нейтронной мощности, ограничением времени работы на мощности критической сборки и выдержкой ТВС в критической сборке в подкритическом состоянии для спада активности в ТВС. Превышение допустимых значений мощности дозы от ТВС может потребовать дополнительной выдержки ТВС перед транспортировкой, что способно повлиять на график испытаний.

Таким образом, обеспечение радиационной безопасности при обращении с ТВС после испытаний на критических стендах требует не только ограничения мощности и времени работы критической сборки, но и оперативного прогноза дозовых характеристик ТВС на различных этапах испытаний. Решить эту задачу на основе измерений средствами дозиметрического контроля невозможно, поскольку наиболее критический с точки зрения безопасности момент – извлечение ТВС из критической сборки персоналом – связан с отсутствием априорной информации о мощности дозы от ТВС. Это обуславливает необходимость использования цифрового двойника критической сборки, позволяющего по истории работы критической сборки на мощности прогнозировать дозовые характеристики ТВС с требуемой точностью.

### **Методическая реализация цифрового двойника критической сборки и назначение предельно допустимой мощности**

В целях практической реализации изложенного подхода к установлению пределов мощности по условиям радиационной безопасности и прогнозирования мощности дозы от ТВС в АО «ОКБМ Африкантов» разработан алгоритм цифрового двойника критической сборки. Цифровой двойник в данном случае представляет собой совокупность взаимосвязанных расчетных моделей и программных модулей. Расчетные модели воспроизводят геометрию критической сборки и ТВС конкретной активной зоны, режимы работы на мощности и последующий распад (или накопление) продуктов деления и активации в материалах ТВС. Программные модули обеспечивают сбор и об-

работку данных с детекторов критической сборки на основе расчетных моделей и выдают персоналу прогноз дозовых характеристик ТВС.

Прогноз дозовых характеристик ТВС персонал должен получать в режиме реального времени, поэтому в цифровом двойнике используются готовые результаты расчетов математических моделей критической сборки и ТВС с использованием аттестованных программных средств, расчет по которым занимает значительное время. Результатами таких расчетов являются следующие функционалы потока нейтронов и фотонов:

1) функции Грина для фотонного излучения от дискретных областей ТВС в точках контроля мощности дозы, которые используются для расчетов плотности потока фотонов от ТВС в контролируемых точках;

2) нормированные спектры нейтронов в ТВС, которые используются в программе нуклидной кинетики для расчетов источников фотонов;

3) относительные коэффициенты пропорциональности между показаниями ионизационных камер и мощности критической сборки и распределения нейтронного потока и скорости реакции деления ядерного топлива в ТВС для всех планируемых режимов испытаний, отличающихся положениями органов СУЗ, количеством ТВС или параметрами замедлителя, которые используются для формирования истории облучения ТВС.

Входными данными цифрового двойника являются конфигурация активной зоны (количество ТВС, положение органов СУЗ, параметры замедлителя), показания нейтронных детекторов, исходный изотопный состав топлива и конструкционных материалов ТВС. По этим данным с использованием результатов предварительно рассчитанных функционалов нейтронного потока формируются истории облучения ТВС, на основании которых в программе нуклидной кинетики рассчитываются временные зависимости интенсивностей источников фотонов в каждой ТВС.

Следующим шагом является свертка интенсивностей источников фотонов, функций Грина и коэффициентов перехода от плотно-

сти потока фотонов к мощности дозы, по результатам которой получают временные зависимости мощности дозы от ТВС в контролируемых точках. Время расчета временных зависимостей мощности дозы от ТВС составляет не более 2 минут.

Таким образом, цифровой двойник обеспечивает оперативную оценку дозовых характеристик ТВС на любой момент испытаний активной зоны. Более подробная методология и результаты первичной апробации алгоритма были представлены на конференции «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника-24)» [6].

Процедура назначения предельно допустимой мощности критической сборки по условиям радиационной безопасности основывается на сопоставлении расчетных дозовых характеристик с установленными нормативными ограничениями. Задавая на вход цифрового двойника вместо реальных показаний нейтронных детекторов требуемые для точности измерений показания тока реактиметра во всех режимах испытаний, можно оценивать мощность дозы от ТВС и подбирать необходимые мощности работы критической сборки и время работы на такой мощности. На основе анализа устанавливается предельно допустимая комбинация «мощность – время работы» для конкретного типа активной зоны и программы испытаний. При этом цифровой двойник позволяет, при необходимости, подобрать эквивалентные по дозовой нагрузке сочетания мощности и времени облучения, оптимизируя режимы испытаний, что особенно актуально для активационных испытаний, когда критическая сборка выводится на повышенный уровень мощности.

Представленный методический подход обеспечивает прямую привязку предельно допустимой мощности критического стенда к контролируемым дозовым характеристикам ТВС и позволяет обеспечить требования радиационной безопасности. При этом назначение эксплуатационных ограничений по мощности приобретает расчетно обоснованный динамический характер и непосредственно привязывается к типу испытываемой активной зоны.

ванный динамический характер и непосредственно привязывается к типу испытываемой активной зоны.

### Заключение

Расширение номенклатуры испытываемых типов активных зон судовых ЯЭУ на критических стендах АО «ОКБМ Африкантов» сопровождается рядом неопределенностей в диапазонах мощности, необходимых для определения нейтронно-физических характеристик, и в оценке дозовых характеристик ТВС после завершения испытаний.

Максимально допустимая мощность критического стенда, определяемая с учетом биологической защиты сооружений, может использоваться в качестве паспортной характеристики. Однако, работа на такой мощности, без учета увеличения дозовых характеристик ТВС, может повлечь превышение контролируемых параметров радиационной безопасности по мощности дозы от ТВС после их извлечения из критической сборки. Поэтому установление пределов по мощности должно основываться на прогнозируемых дозовых характеристиках ТВС. Контроль мощности необходимо сопровождать оценкой и прогнозированием дозовых характеристик ТВС на любой момент испытаний активных зон. Таким образом, контроль мощности критических стендов должен основываться не только на фиксированных проектных ограничениях, но и на динамической оценке радиационных параметров, что способствует обеспечению точности измерений нейтронно-физических характеристик и безопасности персонала при обращении с ТВС.

Эффективным решением устранения вышеуказанных неопределенностей является использование цифровых двойников, позволяющих учитывать индивидуальные особенности конкретной активной зоны, оперативно корректировать режимы испытаний и обеспечивать необходимый уровень радиационной безопасности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Двойнишников Е.А., Макаров В.И., Промохов А.Г., Самойлов О.Б., Морозов О.А., Алексеев В.И., Силаев В.Ю. Концептуальные решения и нейтронно-физические характеристики активных зон атомных ледоколов. *Атомная энергия*. 2019;126(1):19-26. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2518> (дата обращения: 26.09.2025).

Dvoinishnikov E.A., Makarov V.I., Promokhov A.G., Samoiloov O.B., Morozov O.A., Alekseev V.I., Silaev V.Yu. Conceptual solutions and neutron-physical characteristics of active zones of nuclear icebreakers. *Atomic Energy*. 2019;126(1):19-26. (In Russ.). Available at: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2518> (accessed: 26.09.2025).

2. Виноградов М.К., Федудин В.Н. Исследовательские ядерные установки государств-участников Содружества Независимых Государств. Москва: Гелиос АРВ, 2016. 480 с. Режим доступа: [https://flnph-old.jinr.ru/images/content/Books/Nuclear\\_Facilities/Cover.pdf](https://flnph-old.jinr.ru/images/content/Books/Nuclear_Facilities/Cover.pdf) (дата обращения: 26.09.2025).

Vinogradov M. K., Fedulin V. N. Research nuclear installations of the Commonwealth of Independent States member states. Moscow: Helios ARV. 2016. 480 p. (In Russ.). Available at: [https://flnph-old.jinr.ru/images/content/Books/Nuclear\\_Facilities/Cover.pdf](https://flnph-old.jinr.ru/images/content/Books/Nuclear_Facilities/Cover.pdf) (accessed: 26.09.2025).

3. Баринов А.А., Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Самойлов О.Б. Методы обоснования теплотехнической надежности активной зоны тепловых водо-водяных реакторов. *Атомная энергия*. 2016;120(1):270-276. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/508> (дата обращения: 26.09.2025).

Barinov A.A., Dmitriev S.M., Khrobostov A.E., Samoiloov O.B. Methods of substantiation of thermal reliability of the core of thermal water reactors. *Atomic Energy*. 2016;120(1):270-276. (In Russ.). Available at: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/508> (accessed: 26.09.2025).

4. Margolin B.Z., Yurchenko E.V., Morozov A.M. et al. Analysis of relationship between the radiation embrittlement mechanisms and the influence of neutron flux in respect of VVER reactor pressure vessel materials. *Strength of Materials*. 2013;45:406-423. <https://doi.org/10.1007/s11223-013-9473-y>

5. Гусев Н.Г., Ковалев Е.Е., Машкович В.П., Суворов А.П. Защита от ионизирующих излучений: В 2 т. Т.2 Защита от излучений ядерно-технических установок. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 352 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001550413?ysclid=mix5ypo831331576284> (дата обращения: 26.09.2025).

Gusev N.G., Kovalev E.E., Mashkovich V.P., Suvorov A.P. Protection against ionizing radiation: In 2 volumes V.2 Protection against radiation of nuclear technical installations. Moscow: Energoatomizdat. 1990. 352 p. (In Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001550413?ysclid=mix5ypo831331576284> (accessed: 26.09.2025).

6. Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики: Сборник тезисов докладов научно-технической конференции. 28-31 мая 2024 г. Обнинск: ГНЦ РФ – ФЭИ. 2024. 142 с. Режим доступа: [https://www.ippe.ru/images/science\\_info/conference/neutron2024/thesis-nf-2024.pdf](https://www.ippe.ru/images/science_info/conference/neutron2024/thesis-nf-2024.pdf) (дата обращения: 26.09.2025).

Neutron-physical problems of nuclear energy: Collection of abstracts of reports of the scientific and technical conference. May 28-31, 2024, Obninsk, SSC RF – IPPE JSC. 2024. 142 p. (In Russ.). Available at: [https://www.ippe.ru/images/science\\_info/conference/neutron2024/thesis-nf-2024.pdf](https://www.ippe.ru/images/science_info/conference/neutron2024/thesis-nf-2024.pdf) (accessed: 26.09.2025).

### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Васяткин А.Г.** – изучение литературных источников по теме статьи, разработка методического подхода, написание текста статьи;

**Белин А.В.** – анализ предметной области и результатов экспериментов, редактирование текста статьи;

**Соснин М.А.** – анализ предметной области и результатов экспериментов, редактирование текста статьи;

**Молодцов А.А.** – постановка задачи, проверка результатов, редактирование текста статьи;

**Камнев М.А.** – окончательное редактирование и одобрение варианта статьи.

### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Vasyatkin A.G.** – studying references on the topic of the article, developing a methodological approach, writing the article text;

**Belin A.V.** – analyzing the subject area and experiment results, editing the text of the article text;

**Sosnin M.A.** – analyzing the subject area and experiment results, editing the text of the article text;

**Molodtsov A.A.** – setting the objective, checking the results, editing the text of the article text;

**Kamnev M.A.** – final editing and approval of the article version.

### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

### FUNDING:

The authors declare no funding sources.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

### CONFLICT OF INTEREST:

There is no conflict of interest.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Анатолий Геннадьевич Васяткин**, заместитель начальника лаборатории критических систем (сборок) и теплофизики АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Нижегородская обл., Российская Федерация.

e-mail: a.g.vasyatkin@yandex.ru

**Алексей Владимирович Белин**, начальник службы СУЗ лаборатории критических систем (сборок) и теплофизики АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Нижегородская обл., Российская Федерация.

e-mail: rk3tj@yandex.ru

**Михаил Александрович Соснин**, начальник бюро СУЗ и электрооборудования лаборатории критических систем (сборок) и теплофизики АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Нижегородская обл., Российская Федерация.

e-mail: m.a.sosnin@okbm.nnov.ru

**Антон Анатольевич Молодцов**, кандидат технических наук, заместитель начальника НИИК по научным исследованиям и безопасности АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Нижегородская обл., Российская Федерация.

e-mail: dep105@okbm.nnov.ru

**Михаил Анатольевич Камнев**, кандидат технических наук, начальник НИИК АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Нижегородская обл., Российская Федерация.

e-mail: kamnev@okbm.nnov.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Anatolii G. Vasyatkin**, Deputy Head of the Laboratory for Critical Systems (Assemblies) and Thermal Physics of Afrikantov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod region, Russian Federation.

e-mail: a.g.vasyatkin@yandex.ru

**Aleksei V. Belin**, Head of the CPS Service of the Laboratory for Critical Systems (Assemblies) and Thermal Physics of Afrikantov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod region, Russian Federation.

e-mail: rk3tj@yandex.ru

**Mikhail A. Sosnin**, Head of the CPS and Electrical Equipment Group of the Laboratory for Critical Systems (Assemblies) and Thermal Physics of Afrikantov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod region, Russian Federation.

e-mail: m.a.sosnin@okbm.nnov.ru

**Anton A. Molodtsov**, Can. Sci. (Engin.), Deputy Head of the Scientific Research and Testing Complex for Scientific Researches and Safety of Afrikantov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod region, Russian Federation.

e-mail: dep105@okbm.nnov.ru

**Mikhail A. Kamnev**, Can. Sci. (Engin.), Head of the Scientific Research and Testing Complex of Afrikantov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod region, Russian Federation.

e-mail: kamnev@okbm.nnov.ru

Поступила в редакцию / Received 27.10.2025

После доработки / Revision 09.02.2026

Принята к публикации / Accepted 12.02.2026

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

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-02>

УДК 621.311:620.92

EDN YVYQFO

Оригинальная статья / Original paper



**Алгоритм прогнозирования выработки объекта генерации  
возобновляемой энергетики**

**А.Н. Ленских<sup>1</sup> ✉, Е.Ю. Алтунина<sup>2</sup>, А.А. Поволоцкая<sup>3</sup>, А.Е. Дембицкий<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>3</sup>Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация

✉ [lenskikh.andrey51@mail.ru](mailto:lenskikh.andrey51@mail.ru)

**Аннотация.** В данной статье рассмотрено решение задачи определения плана выработки электроэнергии для объекта генерации, который представляет собой ветроэлектростанцию. Ветроэнергетика, как один из перспективных альтернативных способов получения энергии, сталкивается с высокой неопределенностью генерации из-за изменчивости метеорологических условий. Для решения задачи оптимизации плана выработки электроэнергии на ветроэлектростанции в данной работе применены методы машинного обучения, которые позволят анализировать большие объемы данных, получаемых от различных сенсоров и метеорологических станций. Использование моделей машинного обучения способствует точному прогнозированию выработки энергии, что в свою очередь позволяет оптимизировать работу ветроэлектростанции, в том числе за счет корректировки режимов для максимизации коэффициента использования установленной мощности. В работе рассматривалось несколько математических моделей – модель k-ближайших соседей, модель дерева принятия решений, модель случайного леса и градиентный бустинг. Данные модели были подобраны по критерию алгоритмической простоты – их обучение проходит относительно быстро, а также из-за независимости от типа данных. В ходе анализа полученных данных каждой модели была выбрана модель градиентного бустинга – за наименьшее время обработки данных получен наибольший коэффициент детерминации на валидационных данных. Также создан виртуальный интерфейс для более удобного ввода данных и визуализации результатов.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, ветроэнергетика, ветрогенератор, регрессионная модель, моделирование, прогнозирование, градиентный бустинг, модель дерева принятия решений, модель случайного леса, модель k-ближайших соседей, машинное обучение

**Для цитирования:** Ленских А.Н., Алтунина Е.Ю., Поволоцкая А.А., Дембицкий А.Е. Алгоритм прогнозирования выработки объекта генерации возобновляемой энергетики. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(1):15–22. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-02>

**For citation:** Lenskih A.N., Altunina E.Yu., Povolotskaya A.A., Dembitsky A.E. Forecasting algorithm of renewable energy generation facility production. *Nuclear Safety*. 2026;16(1):15–22. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-02>

**Forecasting algorithm of renewable energy generation facility production**

**Andrey N. Lenskih<sup>1</sup> ✉, Ekaterina Yu. Altunina<sup>2</sup>, Anastasia A. Povolotskaya<sup>3</sup>,  
Artyom E. Dembitsky<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>National Research University «ITMO», St. Petersburg, Russian Federation

<sup>3</sup>Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,  
Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation

✉ [lenskikh.andrey51@mail.ru](mailto:lenskikh.andrey51@mail.ru)

**Abstract.** The article considers the solution to the problem of determining the power generation plan for the generating facility, which is a wind power plant. Wind power, as a key renewable energy source, faces high generation uncertainty due to variability of meteorological conditions. In order to solve the task of optimizing the power generation plan at wind power plants, this work applies machine-learning methods that allow for analyzing large amounts of data obtained from various sensors and meteorological stations. The use of machine learning models helps to accurately predict energy production, which in turn allows to optimize the operation of wind power plant, including by adjusting the modes of maximizing the installed capacity utilization factor (ICUF). Several mathematical models are considered – k-nearest neighbor model, decision tree model, random forest model and gradient boosting. These models are chosen because of their algorithmic simplicity, their learning is relatively fast, and also because of their independence from data type. As a result of the analysis of the data obtained from each model, the gradient-boosting model is chosen - the highest coefficient of determination on validation data is obtained for the shortest time of data processing. Also created a virtual interface for easier data entry and visualization of results.

**Keywords:** renewable energy, wind power, wind generator, regression model, modelling, forecasting, gradient boosting, decision tree model, random forest model, k-nearest neighbor model, machine learning

## Введение

Возобновляемая электроэнергия – энергия, получаемая из неисчерпаемых источников энергии. К типам таких источников относят солнечную, ветровую, гидравлическую энергию, а также энергию морских течений, приливов, тепла земли, биомассы. В последние десятилетия доля возобновляемых источников в мировой экономике растет, что, в первую очередь, связано с экологической политикой многих стран и стремлением отказаться от сжигания традиционного топлива, в особенности угля.

Привлекательность возобновляемых источников энергии (далее – ВИЭ) заключена в их естественности, неограниченности, доступности. Также необходимо отметить простоту конструкций генерирующих объектов и стоимость производства электроэнергии из ВИЭ. Это дает возможность обеспечивать малонаселенные и отдаленные территории, где строительство тепловых и атомных электростанций может быть экономически не обоснованно, стабильной подачей энергии.

Недостатком почти всех видов объектов, генерирующих электроэнергию из ВИЭ (в особенности солнечных и ветроэлектростанций), является зависимость от условий окружающей среды [1], а необходимость использования генераторов и аккумуляторов в энергоустановках для обеспечения длительной бесперебойной работы обуславливает значительное удорожание получаемой энергии. Кроме того, невозможно точно определить какое количество энергии от ВИЭ перейдет в энергетическую сеть, поэтому часто

недостаток восполняется выработкой энергии на электростанциях, использующих традиционное топливо, в первую очередь на ТЭС, которые способны к выполнению этой задачи. Однако эксплуатация ТЭС в режиме маневрирования мощностью негативно влияет на оборудование. Для контроля указанного негативного влияния необходимо разработать план выработки объекта генерации ВИЭ. Это позволит снизить объемы дополнительных резервов, размещаемых на теплоэлектростанциях, и оптимизировать системные издержки на электроснабжение всех потребителей. Для создания такого плана предложено применить метод машинного обучения.

Целью данной работы является разработка алгоритма прогнозирования энерговыработки ветроэлектростанции на основе методов машинного обучения с возможностью учета метеорологических данных. Задачи работы:

- определение набора параметров и метрик для сравнения и выбора оптимальной модели прогноза;
- рассмотрение различных математических моделей для алгоритма;
- анализ полученных результатов;
- рассмотрение возможных дальнейших направлений улучшения алгоритма.

## Выбор математической модели

Суть моделей регрессии заключается в моделировании отношений между зависимой переменной и двумя или более независимыми переменными путем выявления за-

висимостей по некоторым законам<sup>1</sup>.

В данной работе сравнивались следующие модели:

– модель k-ближайших соседей заключается в том, что метка (исходная известная характеристика, на основе которой происходит обучение и предсказание модели), присвоенная точке запроса, будет вычисляться на основе среднего значения меток ее ближайших соседей;

– модель дерева принятия решений основана на предсказывании значения целевой переменной, изучая простые правила принятия решений, выведенные из характеристик данных. При визуализации структура имеет вид дерева с различными типами узлов – корневыми, внутренними и конечными;

– модель случайного леса основана на модели дерева принятия решений. Основная идея заключается в использовании ансамбля деревьев решения;

– градиентный бустинг – техника, при которой предсказания строятся не независимо, а последовательно. Бустинг воплощает идею линейного построения линейных моделей. Каждый последующий алгоритм старается уменьшить ошибку текущего ансамбля.

Данные модели были выбраны ввиду их алгоритмической простоты, относительно высокой скорости обучения и малого времени выполнения, а также ввиду их независимости от типа данных (т.е. все перечисленные модели могут работать с категориальными (номинальными) данными без предварительного преобразования в числовой формат). Кроме того, данные методы достаточно эффективны в задачах прогнозирования временных рядов и работы с табличными данными.

Для оценки модели будут рассматриваться следующие метрики:

а) средняя квадратичная ошибка – средний квадрат абсолютных разностей между целевыми значениями и значениями, предсказанными моделью на данном обучающем примере в процессе обучения:

$MSE = 1/N \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|^2$ , где N – количество наблюдений;  $y_i$  – истинное значение для i-го наблюдения;  $\hat{y}_i$  – предсказанное моделью значение для i-го наблюдения;

б) коэффициент детерминации – доля дисперсии зависимой переменной, которая объясняется рассматриваемой моделью зависимости:  $R^2 = 1 - RSS/TSS$ , где RSS – сумма квадратов остатков регрессии, сумма TSS – сумма квадратов отклонений значений от среднего.

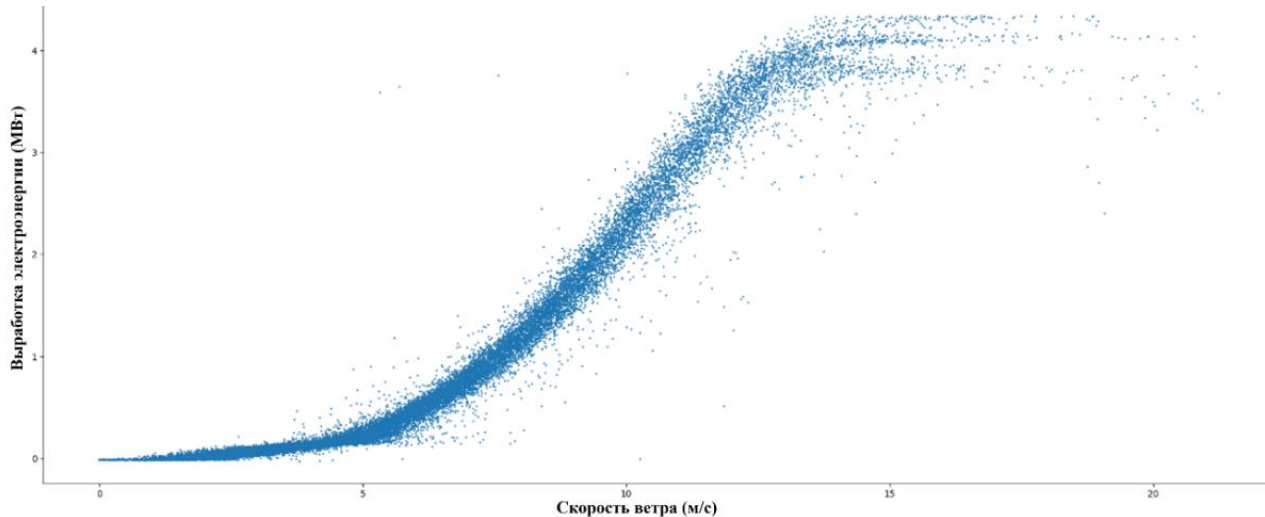
### Предварительная обработка данных

Для прогнозирования мощности ветроэлектростанции (далее – ВЭС) авторами было принято решение использовать модель регрессии на основе машинного обучения. Это позволило получить ряд преимуществ: минимальные затраты времени на составление модели и достаточная точность прогноза модели при наличии большого количества входных данных [2]. Большинство моделей, используемых в машинном обучении, имеют опыт практического применения.

Для подготовки к рассмотрению нескольких математических моделей необходимо произвести предварительную обработку данных, т.к. модели машинного обучения уязвимы к разнообразию входных данных. Предварительная обработка данных начинается с исключения из рассмотрения пустых данных и отрицательных значений выработки электроэнергии, связанных с внеплановой недовыработкой из-за нестабильности ветра и неравномерности производства электроэнергии впоследствии. Рассмотрим их на диаграмме рассеивания выработки электроэнергии от скорости ветра на рисунке 1.

Можно предположить, что многие аномальные значения, наблюдаемые на графике (в основном под главной зависимостью), возникают из-за промежутков ремонта некоторых объектов ВЭС, преднамеренным снижением электропотребления на ВЭС для балансировки потребления электроэнергии (это особенно наблюдается в промежутках выработки наибольшего количества энергии), а также внешним воздействием на лопасти ветрогенераторов, к примеру, птиц [3].

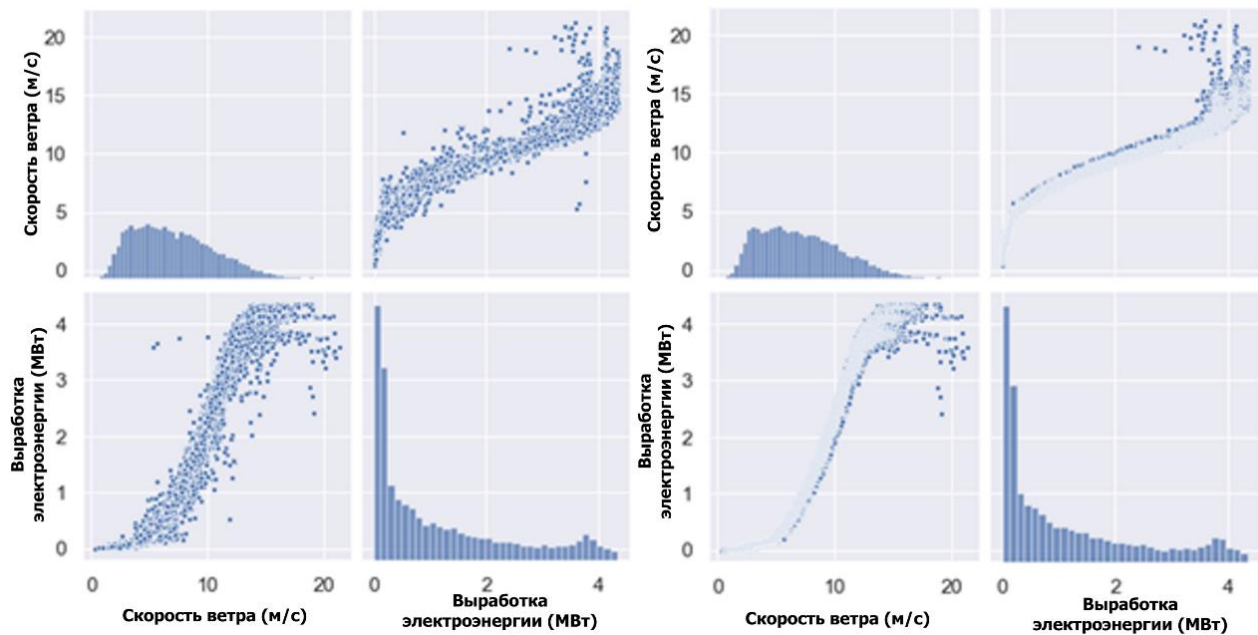
<sup>1</sup> Мхитарян В.С. Анализ данных : учебник для вузов. – Москва: Издательство Юрайт, 2024. – 448 с.



**Рисунок 1.** Диаграмма рассеивания выработки электроэнергии от скорости ветра  
**Figure 1.** The scatter plot of electricity production on wind speed

Для удаления из рассмотрения ненужных в дальнейшей работе данных массив разделяется на несколько групп по скорости с шагом 0,1. В каждой из групп вычисляется среднее значение 0,05- и 0,75-квантиля ( $q_{0,05}$ ,  $q_{0,75}$ ). Разница этих двух квантилей будет определяться как  $\Delta q = q_{0,75} - q_{0,05}$ . В статистической фильтрации и очистке данных чаще всего используются множители около 1,4–1,5 для поиска интервалов, которые охватывают значимую часть данных,

исключая при этом редкие чрезмерные выбросы [4]. Выбор 1,4 является компромиссом между жесткостью фильтрации (чтобы не потерять ценные данные) и тщательностью очистки. В итоге отбрасываться будут те величины, которые не попадают в промежуток  $[q_{0,05} - 1,4\Delta q; q_{0,05} + 1,4\Delta q]$ . Результат предварительной обработки данных, полученный с помощью функций библиотек Pandas и NumPy на языке программирования Python, представлен на рисунке 2.



**Рисунок 2.** График зависимости выработки электроэнергии от скорости ветра до и после предварительной обработки

**Figure 2.** Graph of the dependence of before and after preprocessing

Перед обучением моделей необходимо применить стандартный масштабатор, использующийся при сильном различии между диапазонами или при различиях между единицами изменения свойств. Метод стандартизирует диапазон входных данных путем приведения их всех к значениям, при которых среднее значение наблюдаемых значений равно 0, а среднее отклонение – 1 [5].

### Обучение моделей

На вход будет подаваться несколько свойств:

- скорость ветра;
- месяц;
- час рассматриваемого дня;

На выходе алгоритм формирует почасовой прогноз выработки на горизонт метеорологического прогноза (трое суток).

Обучение происходит на тестовой выборке, составляющей 40% от объема входного датасета с помощью функции `sklearn.model_selection.train_test_split` [6].

Полученные значения метрик представлены в таблице 1, результаты обучения моделей приведены на рисунке 3.

Таблица 1. Результаты анализа моделей

Table 1. Model analysis results

Модель	MSE, МВт	R <sup>2</sup> тестовой выборки	R <sup>2</sup> валид. Выборки	Время выполнения, с
KNeighborsRegressor	0.0178	0.9921	0.9883	0.6
DecisionTreeRegressor	0.0237	1.0000	0.98	0.6
RandomForestRegressor	0.0134	0.9988	0.9912	6.1
GradientBoostingRegressor	0.0121	0.9931	0.9921	1.7

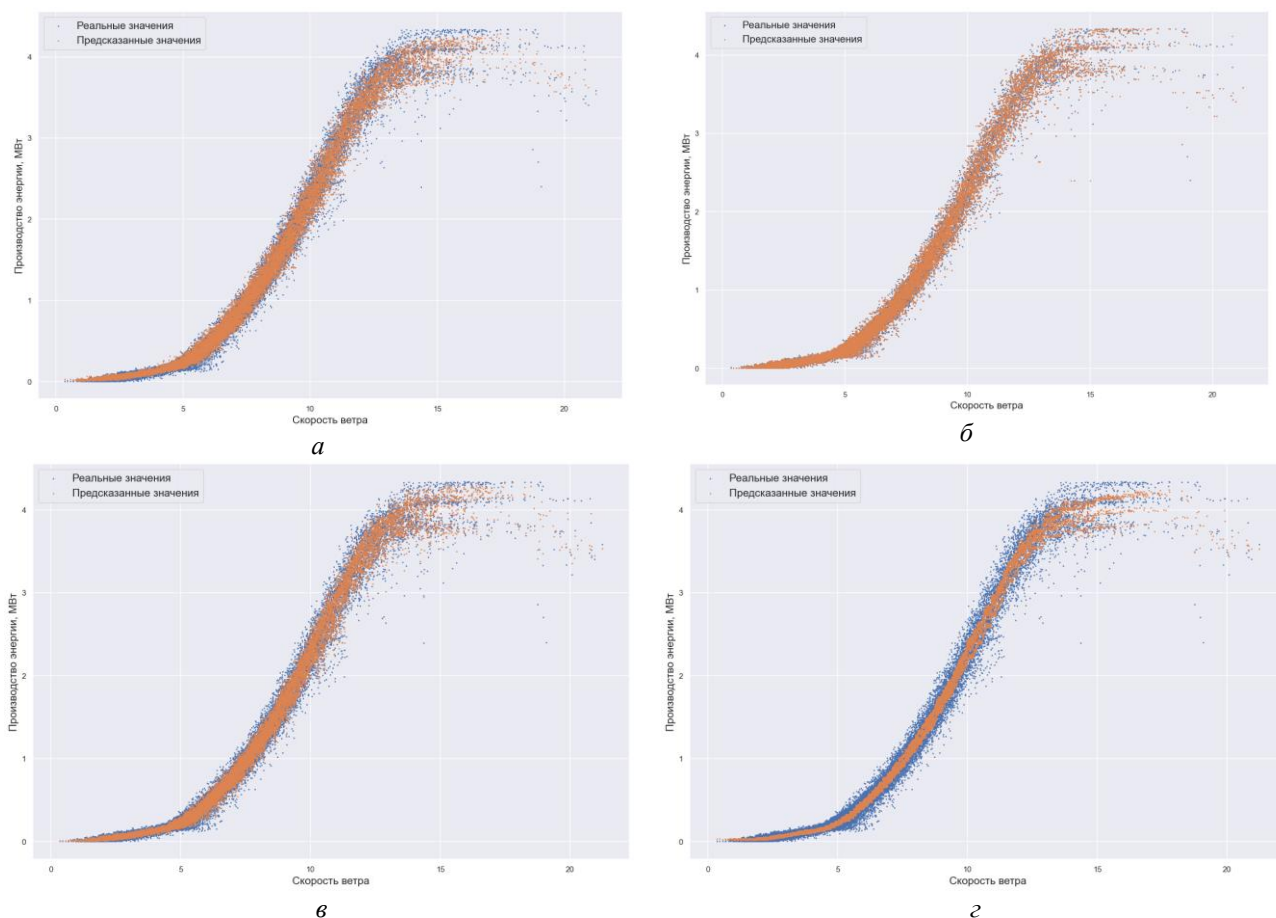


Рисунок 3. Прогнозирование с помощью: а – KNeighborsRegressor; б – DecisionTreeRegressor; в – RandomForestRegressor; г – GradientBoostingRegressor

Figure 3. Forecasting using а – KNeighborsRegressor; б – DecisionTreeRegressor; в – RandomForestRegressor; г – GradientBoostingRegressor

При анализе полученных графиков, метрик моделей и сравнении времени выполнения выбрана модель градиентного бустинга: при относительно малом времени обработки данных был получен наибольший коэффициент детерминации на валидационных данных. Также валидационные данные и метрики показывают, что модель RandomForest имеет большее переобучение, что привело к выбору именно градиентного

бустинга, который минимизирует ошибку последовательно, обеспечивая обобщение лучше, чем RandomForest.

Для удобного ввода и вывода информации создан веб-интерфейс на основе библиотеки React. Для интеграции python применяется микрофреймворк Flask, использующийся для чтения входных данных. Вид интерфейса на входе представлен на рисунке 4.

**Рисунок 4.** UI веб-приложения  
**Figure 4.** UI web applications

На вход принимаются два файла – почасовые выработки конкретной ветроэлектростанции и метеорологический прогноз для местности, имеющие форматы csv, xls,.xlsx или txt. На выходе выгружается обрабо-

танный массив данных, а также график, отображающий почасовые данные выработки энергии, который можно увидеть на рисунке 5.



**Рисунок 5.** UI веб-приложения – вывод информации  
**Figure 5.** UI web applications – information output

## Выводы

В ходе работы проведено сравнение математических моделей для решения задачи определения плана выработки электроэнергии: модель k-ближайших соседей, модель дерева принятия решений, модель случайного леса и градиентный бустинг.

По результатам анализа выбран градиентный бустинг, на основе которого создана рабочая модель машинного обучения для получения величины выработки электроэнергии для ветроэлектростанции. Имея данные прогноза погоды, с помощью этой модели будет получен прогноз выработки электроэнергии, что поможет оптимизировать работу станции в отношении корректировки ее режимов.

Автоматизация прогноза выработки электроэнергии позволит повысить эффективность оперативного планирования, снизить трудозатраты, снизить влияние внешних факторов (в данном случае – погодных условий), ограничивающих выдачу мощности, увеличивая коэффициент использования

установленной мощности путем изменения режима работы ВЭС.

Среди математических моделей градиентный бустинг показал более низкую среднюю квадратичную ошибку и более высокий коэффициент детерминации по сравнению с другими моделями при относительно недолгом времени выполнения.

Одним из способов улучшения метрик модели является дополнение метеорологических данных, таких как температура и давление воздуха, направление ветра и высота расположения ветроэлектростанции.

Возможно дополнение данных минимальной скоростью ветра для работы турбины, скоростью для работы турбины в номинальном режиме и максимальной скорости ветра, после которой срабатывает тормоз турбины, и ее работа прекращается. Учет этих данных поможет в предварительной обработке данных, в первую очередь в отсеивании аномальных значений, наблюдаемых на высоких скоростях ветротурбины.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Захожий К.А. Возобновляемые источники энергии. *Colloquium-journal*. 2020;28(80):57-58. <https://doi.org/10.24412/2520-2480-2020-2880-57-58>
  2. Chen X., Zhang X., Dong M., Huang L., Guo Y., He S. Deep learning-based prediction of wind power for multi-turbines in a wind farm. *Frontiers in Energy research*. 2021;9:723775. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.723775>
  3. Song D., Zheng S., Yang S., Yang J., Dong M., Su M., et al. Annual energy production estimation for variable-speed wind turbine at high-altitude site. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2021;9(3):684-687. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2019.000240>
  4. Tukey J.W. *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley Publishing Company, 1977. P. 688. Available at: [https://archive.org/details/exploratorydataa0000tuke\\_7616/page/n3/mode/2up](https://archive.org/details/exploratorydataa0000tuke_7616/page/n3/mode/2up) (accessed: 02.09.2025).
  5. Флах П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. Москва: ДМК Пресс, 2015. 400 с. Режим доступа: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_008646425/?ysclid=mli2b67snu451963270](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_008646425/?ysclid=mli2b67snu451963270) (дата обращения: 02.09.2025).
- Flah P. *Machine learning. The science and art of building algorithms that extract knowledge from data*. Moscow: HMB Press, 2015. 400 p. (In Russ.). Available at: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_008646425/?ysclid=mli2b67snu451963270](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_008646425/?ysclid=mli2b67snu451963270) (accessed: 02.09.2025).

## ВКЛАД АВТОРОВ:

**Ленских А.Н.** – постановка задачи, разработка математической модели;  
**Алтунина Е.Ю.** – программная реализация математической модели, проведение численных исследований;  
**Поволоцкая А.А.** – подготовка текста статьи;  
**Дембицкий А.Е.** – методологический надзор за исследованием, общее руководство и координация работы.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии внешних источников финансирования.

## AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Lenskih A.N.** – problem statement, development of a mathematical model;  
**Altunina E.U.** – software implementation of a mathematical model, conducting numerical studies;  
**Povolotskaia A.A.** – preparation of the article text;  
**Dembitsky A.E.** – study methodological oversight, overall work guidance and coordination.

## FUNDING:

There are no sources of external funding.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Андрей Николаевич Ленских**, аспирант, кафедра теоретической и экспериментальной физики ядерных реакторов, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: lenskikh.andrey51@mail.ru

**Екатерина Юрьевна Алтунина**, магистр, кафедра компьютерных технологий, Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

e-mail: altunina0ekaterina@gmail.com

**Анастасия Александровна Поволоцкая**, кафедра атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: qqqt0@mail.ru

**Артем Евгеньевич Дембицкий**, кандидат технических наук, зав. кафедрой атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: demartev@yandex.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Andrey N. Lenskih**, Postgraduate, Department of theoretical and experimental physics of nuclear reactors, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.

e-mail: lenskikh.andrey51@mail.ru

**Ekaterina Yu. Altunina**, Master, Department of computer technology, National Research University ITMO, Saint-Petersburg, Russian Federation.

e-mail: altunina0ekaterina@gmail.com

**Anastasia A. Povolotskaia**, Department of atomic energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: qqqt0@mail.ru

**Artyom E. Dembitsky**, Cand. Sci (Eng), Head of the Department of Atomic Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: demartev@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 05.11.2025

После доработки / Revision 09.02.2026

Принята к публикации / Accepted 12.02.2026

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

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-03>

УДК 004.94

EDN LNQMDP

Оригинальная статья / Original paper



**Реализация инструментов интерактивного скрывания полупространства  
моделируемой области**

**А.Э. Копейкин<sup>1</sup> ✉, М.Г. Кузнецов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров,  
Нижегородская обл., Российская Федерация

<sup>2</sup>Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт  
экспериментальной физики, г. Саров, Нижегородская обл., Российская Федерация

✉ [copeikin.artem92@gmail.com](mailto:copeikin.artem92@gmail.com)

**Аннотация.** В данной статье рассматривается разработка и реализация инструментов интерактивного скрывания полупространства моделируемой области для систем проектирования. Актуальность исследования обусловлена необходимостью эффективного анализа внутренних структур сложных 3D-моделей на препроцессорном этапе. В качестве инструментов для реализации алгоритма интерактивного скрывания было выбрано использование языка программирования C++ в интеграции с библиотеками визуализации VTK и OpenGL, а также применение языка шейдеров GLSL. В работе подробно описана математическая модель и реализация интерактивного 3D-виджета, позволяющего пользователю в реальном времени управлять положением и ориентацией секущей плоскости посредством аффинных преобразований (переноса, вращения, масштабирования). Особое внимание в исследовании уделено реализации алгоритмов для двух типов данных. Для геометрических моделей разработан подход на базе вершинных и фрагментных шейдеров: вычисляется положение вершин относительно уравнения плоскости, выполняется отсечение элементов и отбрасываются только те, которые находятся над плоскостью, затем выполняется интерполяция по примитиву, а использование буфера трафарета (stencil buffer) обеспечивает корректное «закрашивание» сечения для сохранения иллюзии сплошного объекта. Для сеточных моделей реализован алгоритм топологической фильтрации, который физически отсекает ячейки и выполняет перестроение элементов, пересекаемых плоскостью. Разработанный функционал имеет высокую практическую значимость для ускорения процесса подготовки моделей. Результаты тестирования на ряде моделях демонстрируют высокую скорость работы алгоритма, корректность отображения срезов, эффективное использование ресурсов для своей задачи, а также высокую масштабируемость. Практическая значимость работы заключается в интеграции разработанных инструментов интерактивного скрывания в специализированное программное обеспечение, что позволяет инженерам-расчетчикам существенно ускорить процесс подготовки моделей, эффективно выявлять геометрические коллизии и задавать граничные условия как на поверхностных, так и на внутренних элементах.

**Ключевые слова:** интерактивное скрывание, плоскость отсечения, визуализация, VTK, сеточная модель, геометрическая модель, закрашивание сечения, виджет, GLSL, OpenGL

**Для цитирования:** Копейкин А.Э., Кузнецов М.Г. Реализация средств интерактивного скрывания полупространства моделируемой области. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(1):23–33. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-03>

**For citation:** Kopeikin A.E., Kuznetsov M.G. Implementation of interactive means of concealing the half-space of the modeled area. *Nuclear Safety*. 2026;16(1):23–33. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-03>

## Implementation of interactive tools of concealing the half-space of the modeled area

Artyom E. Kopeikin<sup>1</sup> ✉, Mikhail G. Kuznetsov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sarov Institute of Physics and Technology – Branch of NRNU MEPhI, Sarov, Nizhny Novgorod region, Russian Federation

<sup>2</sup> Institute of Theoretical and Mathematical Physics, Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region, Russian Federation

✉ copeikin.artem92@gmail.com

**Abstract.** This paper discusses the development and implementation of tools for interactive hiding of the half-space of a modeled area for design systems. The relevance of this research comes from the need for effective analysis of the internal structures of complex 3D models at the pre-processing stage. The C++ programming language is chosen as the tool to implement the interactive occlusion algorithm, integrated with the VTK and OpenGL visualization libraries, as well as the GLSL shader language. The paper describes in detail the mathematical model and implementation of an interactive 3D widget that allows the user to control the position and orientation of the cutting plane in real time using affine transformations (translation, rotation, scaling). The study pays particular attention to the implementation of algorithms for two types of data. An approach based on vertex and fragment shaders has been developed for geometric models: the position of vertices relative to the plane equation is calculated, elements are clipped, and only those above the plane are discarded, then interpolation is performed on the primitive, and the use of a stencil buffer ensures correct “coloring” of the cross-section to preserve the illusion of a solid object. A topological filtering algorithm is implemented for mesh models that physically cuts off cells and rearranges elements intersected by the plane. The developed functionality is of high practical importance, as it is designed to speed up the model preparation process. Testing results on a number of models demonstrate the high speed of the algorithm, the correctness of the display of cross-sections, the efficient use of resources for its task, and high scalability. The practical significance of the work lies in the integration of the developed interactive occlusion tools into specialized software, which allows engineers to significantly speed up the model preparation process, effectively identify geometric collisions, and set boundary conditions on both surface and internal elements.

**Keywords:** interactive hiding, clipping plane, visualisation, VTK, mesh model, geometric model, section colouring, widget, GLSL, OpenGL

### Введение

Современные научные, инженерные и производственные процессы невозможно представить без применения компьютерных технологий. С развитием вычислительных мощностей появилась возможность создания численных моделей различных объектов. Эти модели активно используются в системах, занимающихся проектированием (Computer Aided Design), расчетами (Computer Aided Engineering) и производством (Computer Aided Manufacturing) моделируемых объектов. Во всех этих системах необходимо точно или приближенно описывать геометрическую форму объектов.

Особую значимость данные подходы приобретают в задачах атомной отрасли. Проектирование реакторных установок и их элементов (например, тепловыделяющих сборок, парогенераторов, насосного оборудования) сопряжено с созданием сложнейших геометрических моделей, содержащих тысячи скрытых деталей. Инструменты интерактивного скрытия позволяют инженеру-

конструктору визуально верифицировать внутреннюю компоновку оборудования и выявлять коллизии на ранних стадиях проектирования (при работе с CAD-геометрией).

В свою очередь, на этапе подготовки расчетных моделей важно корректно задавать начальные и граничные условия как на поверхностных элементах, так и на внутренних. Инструменты интерактивного скрытия позволяют инженеру-расчетчику быстро выделять необходимые внутренние зоны для задания различных нагрузок, креплений и т.д., что делает процесс подготовки расчетных моделей более эффективным.

Процесс решения задач обычно включает несколько этапов: препроцессорный (подготовительный), этап вычислений и постпроцессорный (обработка результатов)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Денисов М.А. Математическое моделирование тепловых процессов. ANSYS и CAE-проектирование: учебное пособие. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 149 с. – Режим доступа: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/41264> (дата обращения: 02.12.2025).

На препроцессорном этапе определяется тип расчета, строится или импортируется из других программ геометрическая модель объекта, выполняется конечно-элементное разбиение – строится сетка [1], задаются свойства материалов и прикладываются нагрузки, включая граничные условия, усилия и перемещения, а также вводятся исходные данные.

На этапе вычислений запускается расчетная программа, а результаты (например, перемещения, температуры, напряжения, деформации, скорости и тепловые потоки) записываются в специальные файлы.

На постпроцессорном этапе результаты визуализируются с помощью программного обеспечения, которое позволяет отображать данные одного шага решения, а также позволяет отслеживать изменения результатов во времени. Эти данные могут быть представлены графически или в виде текстового листинга, при этом возможно проведение дополнительных вычислений.

Одним из важных аспектов работы на препроцессорном этапе является использование интерактивных виджетов. Это небольшие приложения, которые позволяют пользователю работать с параметрами и настройками модели, улучшая процесс ее создания и повышая его эффективность.

В рамках представленной статьи будет рассмотрена разработка интерактивного виджета для скрытия полупространства моделируемой области с использованием технологий VTK (Visualization Toolkit) [2,3], OpenGL<sup>2,3</sup>, GLSL на языке программирования C++.

Плоскости отсечения широко используются в технической визуализации для исследования сложных 3D-форм<sup>4</sup>. Устраняя пространственную преграду (occlusion), они

позволяют пользователю более эффективно просматривать внутренние или скрытые детали объектов. Этот механизм отсечения является быстрой и легко понятной техникой с простым взаимодействием. Он часто используется в системах рендеринга и API для реализации процесса растеризации, где важно обрезать объекты относительно плоскости отсечения. Однако для ряда приложений, таких как автоматизированное проектирование, необходима возможность дополнительной настройки плоскостей отсечения, управляемых пользователем. Кроме того, требуется высокая частота кадров для интерактивного изменения параметров плоскости в реальном времени, обеспечивая при этом высокое качество визуализации.

Актуальность работы обусловлена тем, что обрезка модели с помощью плоскости отсечения дает возможность эффективно исследовать внутренние структуры объекта. Для моделей, состоящих из нескольких деталей, желательно сохранить иллюзию сплошного объекта, что требует закрытия сечения модели после выполнения операции обрезки. Это особенно важно для систем проектирования, где требуется создание поперечных сечений массивных объектов, что позволяет исключить пространственные помехи и улучшить анализ внутренней структуры.

Цель – разработать и реализовать инструменты интерактивного скрытия полупространства моделируемой области, которые могут быть использованы на этапах подготовки геометрических и сеточных моделей, а также при задании начальных и граничных условий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) реализовать интерактивный виджет для плоскости отсечения;
- 2) реализовать алгоритм скрытия полупространства для геометрической модели;
- 3) реализовать алгоритм скрытия полупространства для сеточной модели;
- 4) реализовать алгоритм закрашивания сечения.

Научная новизна заключается в разработке и оптимизации алгоритмов скрытия полупространства для геометрических и сеточ-

<sup>2</sup> Joey de Vries. Learn OpenGL. An offline transcript of learnopengl.com. – Kendall & Welling, 2020. – 523 p. – Режим доступа: <https://ia600102.us.archive.org/5/items/learnopengl/learnopengl.pdf> (дата обращения: 02.12.2025).

<sup>3</sup> OpenGL red book (Russian version). – 2013. – 476 p. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/books61/RedBook.pdf> (дата обращения: 02.12.2025).

<sup>4</sup> Голованов Н.Н. Геометрическое моделирование : учебник – Москва: КУРС : ИНФРА-М, 2016. – 400 с. Режим доступа: [https://lib.yvsu.am/open\\_books/415823.pdf](https://lib.yvsu.am/open_books/415823.pdf) (дата обращения: 02.12.2025).

ных моделей, а также в интеграции этих алгоритмов с современными технологиями визуализации. Это позволяет повысить эффективность и гибкость взаимодействия с моделями в процессе подготовки и анализа в инженерных и научных приложениях.

*Практическая значимость:* разработанные средства позволят ускорить процесс подготовки сложных геометрических и сеточных моделей, а также процесс задания начальных и граничных условий.

В данной работе описывается процесс разработки и реализации инструментов скрытия полупространства моделируемой области. Приведены примеры использования реализованных средств.

### Полупространство и скрытие

*Полупространство, ограниченное гиперплоскостью  $\alpha$ ,* – это геометрическая фигура в пространстве, для которой выполняется следующее:

1) фигура включает в себя плоскость  $\alpha$ , но не сводится к ней (рис. 1а);

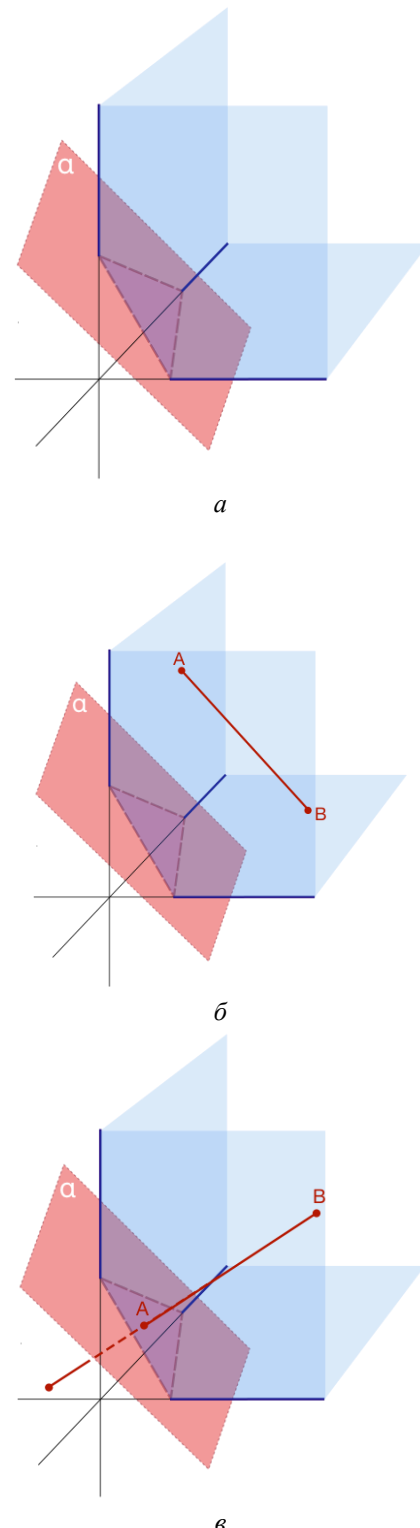
2) любой отрезок, ограниченный произвольными точками этой фигуры  $A$  и  $B$ , не принадлежащими  $\alpha$ , не имеет пересечений с плоскостью  $\alpha$  (рис. 1б);

3) любой отрезок, ограниченный произвольными точками этой фигуры  $A$  и  $B$ , где  $A$  принадлежит  $\alpha$ , а  $B$  – нет, имеет пересечение с плоскостью  $\alpha$  (рис. 1в).

Интерактивное скрытие полупространства основывается на применении геометрических операций и алгоритмов для определения видимых и скрытых частей трехмерных моделей.

### Разработка интерактивного виджета для задания параметров плоскости

Для выполнения поставленных задач необходим интерактивный элемент, с помощью которого будут выполняться вышеописанные действия. Наилучшим образом подходит плоскость, которая будет изменять свои размеры, перемещаться и вращаться в пространстве при использовании ее пользователем.



**Рисунок 1.** Полупространство: а – ограниченное гиперплоскостью; б – ограниченное гиперплоскостью, не включающей отрезок  $AB$ ; в – ограниченное гиперплоскостью, включающей точку  $A$

**Figure 1.** Half-space: а – limited by a hyperplane; б – limited by a hyperplane excluding the segment  $AB$ ; в – limited by a hyperplane, including point  $A$

Взаимодействие с виджетом требует применения некоторых математических концепций и формул<sup>5</sup> [4]. Рассмотрим некоторые из них:

### 1. Перенос.

Если каждая точка  $P(x, y, z)$  отображается на точку  $P'(x', y', z')$  в соответствии с уравнениями (1):

$$\begin{cases} x' = x + a_1, \\ y' = y + a_2, \\ z' = z + a_3, \end{cases} \quad (1)$$

где  $a_1, a_2, a_3$  – константы, то этот процесс называется переносом в трехмерном пространстве. Такой перенос может быть записан в матричной форме (2):

$$\begin{bmatrix} x' & y' & z' & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix} T, \quad (2)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ a_1 & a_2 & a_3 & 1 \end{bmatrix}.$$

### 2. Масштабирование.

Для изменения размеров элемента можно использовать простые математические формулы.

Растяжение на  $k_x, k_y, k_z$  запишем в виде выражений (3):

$$\begin{cases} x' = k_x x, \\ y' = k_y y, \\ z' = k_z z. \end{cases} \quad (3)$$

В матричном виде (4):

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Сжатие на  $k_x, k_y, k_z$  запишем в виде (5):

$$\begin{cases} x' = x / k_x, \\ y' = y / k_y, \\ z' = z / k_z. \end{cases} \quad (5)$$

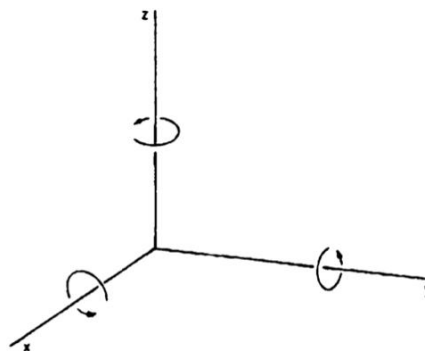
В матричном виде (6):

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/k_x & 0 & 0 \\ 0 & 1/k_y & 0 \\ 0 & 0 & 1/k_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (6)$$

### 3. Поворот.

Для вращения элемента на заданный угол  $\theta$  можно использовать матрицу поворота.

Любое вращение в трехмерном пространстве может быть представлено как композиция поворотов вокруг трех ортогональных осей (например, вокруг осей декартовых координат, как показано на рисунке 2). Этой композиции соответствует матрица, равная произведению соответствующих трех матриц поворота.



**Рисунок 2.** Вращение в положительном направлении вокруг координатных осей

**Figure 2.** Rotation in a positive direction around the coordinate axes

Для поворота вокруг оси  $Ox$  формула будет иметь следующий вид (7):

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где  $(x, y, z)$  – исходные координаты элемента,  $(x', y', z')$  – координаты элемента после поворота.

Для поворота вокруг оси  $Oy$  будет иметь вид (8):

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (8)$$

<sup>5</sup> Порев В.Н. Компьютерная графика : учебное пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 432 с. – Режим доступа: <https://lib.agu.site/upload/iblock/233/Computer%20graphics.pdf> (дата обращения: 02.12.2025).

Для поворота вокруг оси  $Oz$  будет иметь вид (9):

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Все три поворота делаются независимо друг от друга, т.е. если надо повернуть вокруг осей  $Ox$  и  $Oy$ , вначале делается поворот вокруг оси  $Ox$ , потом применительно к полученной точке делается поворот вокруг оси  $Oy$ .

Положительным углам при этом соответствует вращение вектора против часовой стрелки в правой системе координат, и по часовой стрелке в левой системе координат, если смотреть против направления соответствующей оси.

### Интерсекция модели и плоскости, ее математическая модель

Интерсекция математической модели и плоскости может быть выполнена с использованием уравнений, описывающих как саму плоскость, так и модель.

Для нахождения интерсекции воспользуемся уравнением плоскости, заданное в виде неявной функции (10):

$$Ax + By + Cz + D = 0, \quad (10)$$

где  $(A, B, C)$  – нормаль к плоскости;

$(x, y, z)$  – координаты точек на плоскости;

$D$  – коэффициент, расстояние от плоскости до начала координат.

Предположим, что у нас есть математическая модель, заданная уравнением (11):

$$F(x, y, z) = 0, \quad (11)$$

где  $F$  – функция, определяющая форму поверхности.

Интерсекция будет представлять собой точки, удовлетворяющие как уравнению математической модели, так и уравнению плоскости. Таким образом, мы ищем решения следующей системы уравнений (12):

$$\begin{cases} F(x, y, z) = 0, \\ Ax + By + Cz + D = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Таким образом, общий принцип интерсекции заключается в нахождении точек, удовлетворяющих как уравнению математической модели, так и уравнению плоскости. Количество и характер этих точек зависит от конкретных уравнений модели и плоскости.

Теперь рассмотрим замечание, которое необходимо для нашей задачи. Для того чтобы определить какие части математической модели нужно скрывать, необходимо учитывать:

если  $Ax + By + Cz + D > 0$ , то точка находится по одну сторону плоскости;

если  $Ax + By + Cz + D < 0$ , то точка находится по другую сторону плоскости;

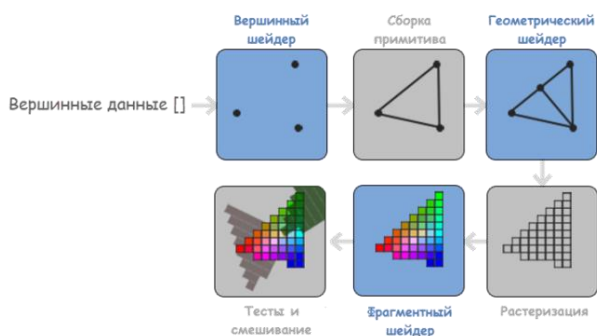
если  $Ax + By + Cz + D = 0$ , то точка лежит на плоскости.

В общем случае, если у нас есть модель с уравнением, то мы можем использовать значения координат точек на модели в уравнении плоскости, чтобы определить, по какую сторону от плоскости они находятся.

### GLSL для скрывания полупространства

Язык программирования шейдеров OpenGL Shading Language (GLSL) предоставляет уникальные возможности для эффективной работы с графическими процессорами (GPU). Благодаря GLSL, разработчики могут использовать мощь современных GPU для сложных вычислений и визуализации. Один из шагов в использовании GLSL – создание программы на основе последней версии OpenGL API, которая интегрируется с библиотекой VTK для визуализации.

Любая программа, использующая OpenGL API, включает одну или несколько программ на языке GLSL, которые называются шейдерами. Шейдеры выполняются на GPU и проходят через различные этапы в общем конвейере OpenGL. Каждый шейдер имеет свою задачу, и в зависимости от этапа он может обрабатывать вершины, пиксели или выполнять другие вычисления [5]. На рисунке 3 приведены все типы шейдеров, доступных в OpenGL.



**Рисунок 3.** Вершинный и фрагментный шейдеры  
**Figure 3.** Vertex and fragment shaders

Вершинные шейдеры выполняют манипуляции с координатами в 3D-пространстве и вызываются один раз для каждой вершины. Главной задачей вершинного шейдера является настройка переменной *gl\_Position*, которая является встроенной глобальной переменной GLSL, используемой для хранения положения текущей вершины.

Шейдеры фрагментов (или текстур) определяют цвета RGBA (красный, зеленый, синий, альфа) для каждого обрабатываемого пикселя. Один шейдер фрагментов вызывается один раз на пиксель. Основная цель фрагментного шейдера – настройка переменной *gl\_FragColor*, которая является встроенной переменной GLSL, аналогичной *gl\_Position*.

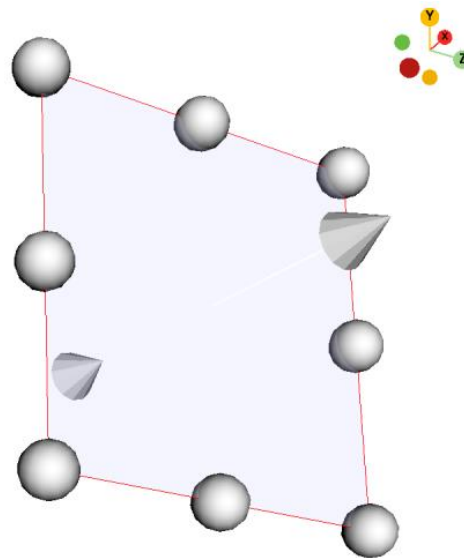
Между вершинным и фрагментным шейдерами существует дополнительный этап, называемый геометрическим шейдером. Этот шейдер принимает на вход набор вершин, представляющих собой единый примитив, такой как точка или треугольник. Геометрический шейдер может трансформировать эти вершины и передать их на следующий этап. Особенность геометрического шейдера заключается в том, что он способен преобразовывать исходный примитив в другие примитивы, возможно, генерируя больше вершин, чем было задано изначально.

Для получения значимых результатов необходимо как-то получить вывод с предыдущего этапа шейдера. GLSL предоставляет встроенную переменную *gl\_in*, которая дает доступ к данным предыдущего этапа. Одним из важных элементов является переменная *gl\_ClipDistance*, играющая ключевую роль

при пересечении геометрической модели с плоскостью.

### Программная реализация интерактивного виджета плоскости

Интерактивный виджет плоскости будет иметь вид, как показано на рисунке 4.



**Рисунок 4.** Отображение виджета на экране  
**Figure 4.** Widget display on a screen

Управление виджетом происходит с помощью специальных объектов, выделенных серым цветом. Рассмотрим изменение размера, вращения и перемещения плоскости по отдельности.

1. Вращение плоскости будет происходить удержанием левой кнопки мыши нормали, как показано на рисунке 5а.

2. Перемещение плоскости будет происходить удержанием левой кнопки мыши самой плоскости вдоль нормали, как показано на рисунке 5б.

3. Изменение размером будет происходить с использованием, так называемых точек или сфер, которые изображены на плоскости. Каждая из этих сфер имеет свои функции, которые содержат алгоритм изменения плоскости.

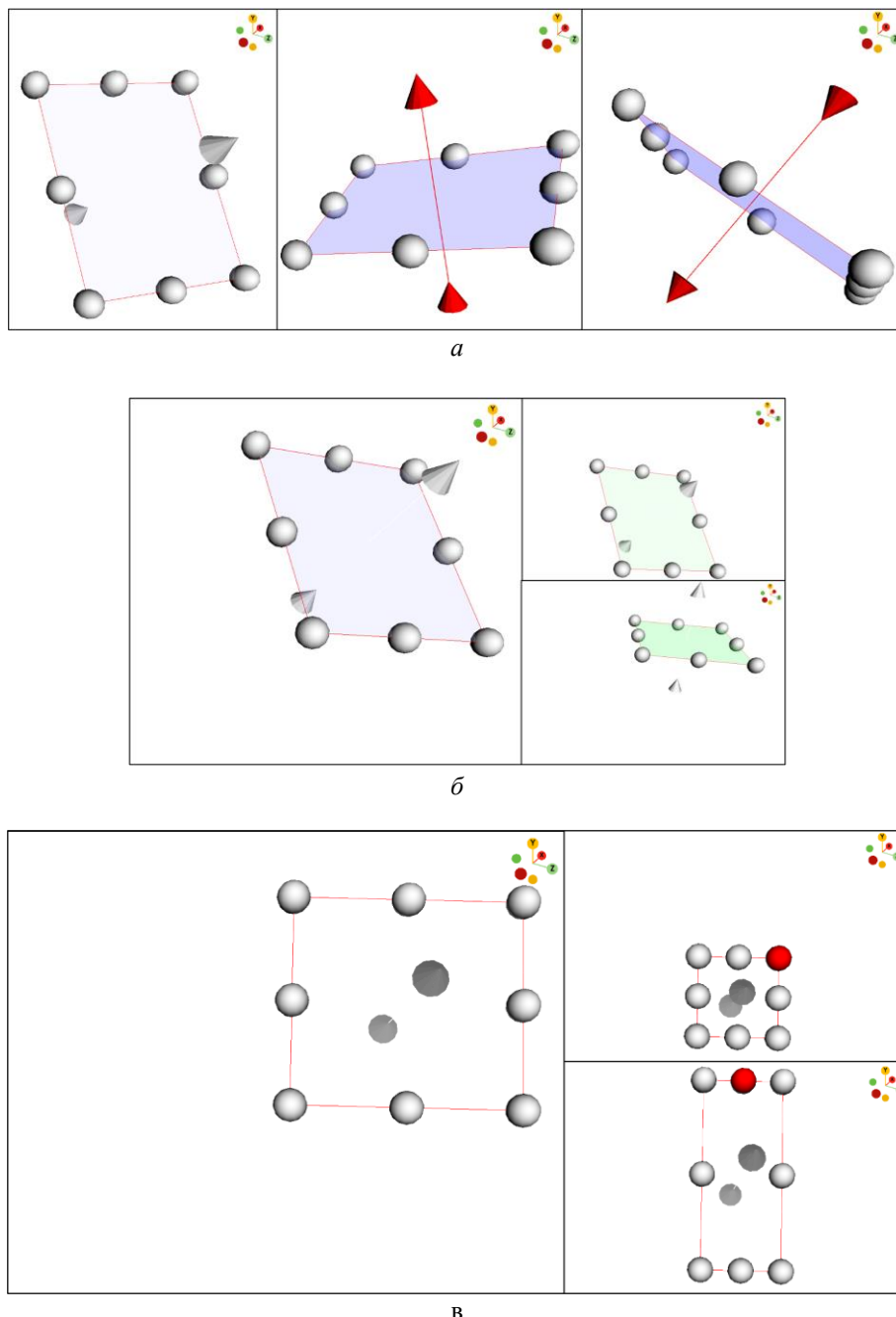
Основная концепция изменения размеров плоскости заключается в том, что 3 точки, играющие основу плоскости, должны сохранять свои позиции. То есть сама плоскость не должна перемещаться при использовании

интерактивных элементов. В таком случае ставятся две задачи:

1) описать плоскость так, чтобы при взаимодействии с центральными сферами каждой стороны она изменяла свой размер только относительно двух ортогональных сторон, приложенных к данной. То есть сторона, на которой находится сфера, и параллельная ей не должны менять своего размера, а также параллельная сторона должна сохранять свое положение относительно движущейся стороны;

2) описать плоскость так, чтобы при взаимодействии с угловыми сферами она не меняла своего положения относительно угла противоположного данному. То есть при взаимодействии с угловой сферой плоскость должна менять размер всех своих сторон, но должна сохранять положение точки, находящейся на противоположном углу от выбранной интерактивной сферы.

На рисунке 5в показаны эти две задачи.



**Рисунок 5.** Вращение плоскости – *a*; перемещение плоскости – *б*; изменение размеров плоскости – *в*  
**Figure 5.** Plane rotation – *a*; Plane movement – *б*; Plane resizing – *в*

## Программная реализация скрытия сеточных моделей

Для реализации программной части скрытия сеточных моделей создадим такой класс, который будет представлять собой фильтр для обрезки полигональных данных с использованием плоскости разреза. Принцип работы этого фильтра будет заключается в том, чтобы отсечь часть полигональных данных, находящуюся с одной стороны плоскости разреза, и перестроить данные, находящиеся на пересечении с плоскостью.

Рассмотрим алгоритм работы фильтра подробнее:

1. Фильтр требует определения плоскости разреза в виде неявной функции. Плоскость задается нормалью (вектором, указывающим направление плоскости) и точкой, через которую проходит плоскость.



Рисунок 6. Скрытие полупространства: *a* – первой сеточной модели; *б* – второй сеточной модели  
Figure 6. Half-space hiding: *a* – the first mesh model; *б* – the second mesh model

## Программная реализация скрытия геометрических моделей

Переменная *gl\_ClipDistance* обеспечивает прямой совместимый механизм для управления пользовательским отсечением. Элемент *gl\_ClipDistance[i]* определяет расстояние отсечения для каждой пользовательской плоскости отсечения *i*. Расстояние 0.0 означает, что вершина находится на плоскости, положительное расстояние означает, что вершина находится внутри плоскости отсечения, а отрицательное расстояние означает, что точка находится вне плоскости отсечения. Расстояния отсечения будут линейно интерполированы по примитиву, а часть примитива с интерполированными расстояниями менее 0.0 будет обрезана.

2. Устанавливается входной объект (полигональные данные) и параметры плоскости разреза.

3. Выполняем проверку на пересечение. Если его нет и все ячейки над плоскостью, то отбрасываем все данные. Если под плоскостью, то оставляем все ячейки. Если пересечение есть, то оставляем ячейки, находящиеся под плоскостью, целыми. Данные над плоскостью отбрасываем. А для ячеек, которые пересекают плоскость, находим их пересечение и перестраиваем.

4. Обрезанный результат может быть визуализирован или использован в дальнейшем анализе.

Для демонстрации работы алгоритма использованы модели, полученные из доступных интернет-источников. На рисунке 6 показан результат выполнения алгоритма.

Однако алгоритм скрытия полупространства для геометрических моделей будет работать некорректно на всех устройствах. Так как при выполнении функции *gl\_ClipDistance* неправильно обрабатывается драйвер. Из-за него нарушается отображение.

В связи с этим была поставлена задача написания своей функции в шейдере для скрытия полупространства. Алгоритм будет иметь следующий вид:

1. Будем передавать в вершинный шейдер параметры плоскости: направление нормали и центр плоскости.

2. В шейдере известны координаты вершин *vertexP*, поэтому найдем вектор от вершины до плоскости (13):

$$to0 = plane0 - vertexP. \quad (13)$$

3. Затем вычислим расстояние, то есть найдем скалярное произведение вектора и нормали (14):

$$dot = (toO, planeN). \quad (14)$$

4. Передадим  $dot$  в фрагментный шейдер. Определяем по какую сторону от плоскости находится вершина, для это выполним проверку скалярного произведения:

$dot < 0$ , то вершина за плоскостью;

$dot > 0$ , то вершина перед плоскостью;

$dot = 0$ , то вершина на плоскости.

5. Так как вершины, находящиеся за плоскостью нам не нужны, то будем отбрасывать их. Для этого существует функция отбрасывания  $discard$ . Команда  $discard$  используется во фрагментном шейдере для указания, что текущий фрагмент (пиксель) не должен быть записан в буфер кадра

( $framebuffer$ ). Как только команда  $discard$  выполняется, шейдер прекращает обработку текущего фрагмента. Значение, рассчитанное для  $gl\_FragColor$  или других выходных переменных, игнорируется.

Для закрашивания сечения будем использовать буфер трафарета. Буфер трафарета обеспечивает простой способ добавления шапки к объектам, которые пересекаются плоскостью отсечения. Ограничивающий полигон встраивается в плоскость отсечения, а буфер трафарета используется для обрезки полигона до внутренней части твердого тела.

Таким образом, выполняется скрытие полупространства для геометрических моделей, как показано на рисунке 7. Модели также были получены из доступных интернет-источников.

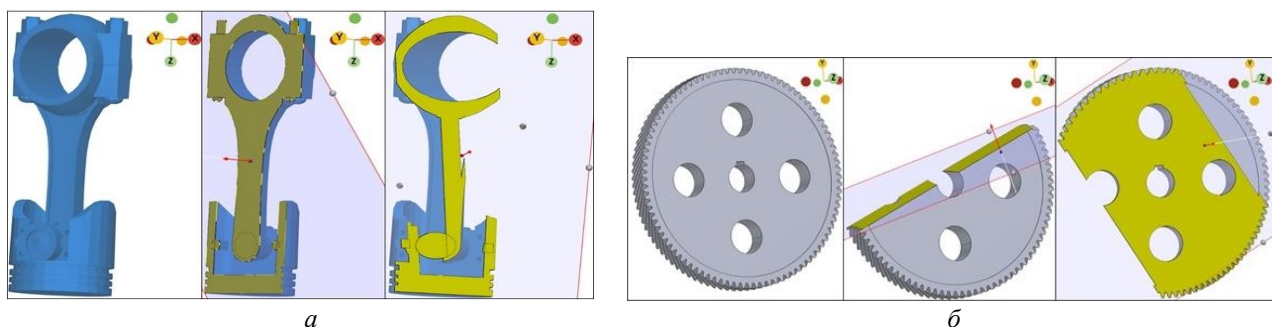


Рисунок 7. Скрытие полупространства:  $a$  – первой геометрической модели;  $b$  – второй геометрической модели

Figure 7. Half-space hiding:  $a$  – the first geometric model;  $b$  – the second geometric model half-space hiding

## Заключение

В ходе работы было выполнено следующее:

- реализация виджета плоскости для интерактивного скрытия полупространства;

- разработаны и реализованы алгоритмы интерактивного скрытия полупространства моделируемой области для геометрических и сеточных моделей, а также закрашивание сечения;

- продемонстрирована работоспособность реализованных алгоритмов на тестовых моделях.

Таким образом, поставленная задача по реализации инструментов интерактивного скрытия полупространства моделируемой области была выполнена.

Практическая значимость результатов работы заключается в возможности интеграции инструментов интерактивного скрытия в специализированное программное обеспечение, используемое на предприятиях атомной отрасли. Внедрение разработанного виджета и алгоритмов позволит инженерам-конструкторам проводить визуальную верификацию внутренней структуры изделий, а инженерам-расчетчикам – корректно задавать начальные и граничные условия (нагрузки, крепления и т.д.) как на поверхностных, так и на внутренних элементах. Использование данных инструментов интерактивного скрытия существенно повышает эффективность процесса подготовки расчетных моделей и снижает риск возникновения ошибок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Лисейкин В.Д. Технология построения разностных сеток: Монография. Новосибирск: Наука, 2014. 208 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007499394> (дата обращения: 12.11.2025).  
Liseykin V.D. Technology of building difference schemes: monograph. Novosibirsk: Nauka, 2009. 414 p. (in Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007499394> (accessed: 12.11.2025).
2. Avila L.S. The VTK user's guide: 11th edition. Kitware, 2010. 536 с. Available at: <https://vtk.org/wp-content/uploads/2021/08/VTKUsersGuide.pdf> (accessed: 12.11.2025).
3. Schroeder W., Martin K., Lorensen B. The visualization toolkit an object-oriented approach to 3D graphics. Edition 4.1. Kitware, 2018. 541 с. Available at: <https://gitlab.kitware.com/vtk/textbook/raw/master/VTKBook/VTKTextBook.pdf> (accessed: 12.11.2025).
4. Аммерал Л. Принципы программирования в машинной графике. Монография. Москва: Сол Систем, 1992. 224 с. Режим доступа: <https://djuv.online/file/CcaeTUO2bjGaa?ysclid=mkwclmw8es933611894> (дата обращения: 12.11.2025).  
Ammeral L. Programming principles in computer graphics. Monograph. Moscow: Sol System, 1992. 224 p. (in Russ.). Available at: <https://djuv.online/file/CcaeTUO2bjGaa?ysclid=mkwclmw8es933611894> (accessed: 12.11.2025).
5. Вольф Д. Open GL 4. Язык шейдеров. Книга рецептов. Пер. с англ. А.Н. Киселева. Москва: ДМК Пресс, 2015. 368 с. Режим доступа: [https://download.blackball.lv/data/library/OpenGL\\_4\\_Jazyk\\_shejderov\\_Kniga\\_receptov\\_%282013%29.pdf](https://download.blackball.lv/data/library/OpenGL_4_Jazyk_shejderov_Kniga_receptov_%282013%29.pdf) (дата обращения: 12.11.2025).  
Wolf D. OpenGL 4. Shader language. Cookbook, translated from English by A.N. Kiselev. Moscow: DMK Press, 2015. 368 p. (in Russ.). Available at: [https://download.blackball.lv/data/library/OpenGL\\_4\\_Jazyk\\_shejderov\\_Kniga\\_receptov\\_%282013%29.pdf](https://download.blackball.lv/data/library/OpenGL_4_Jazyk_shejderov_Kniga_receptov_%282013%29.pdf) (accessed: 02.11.2025).

## ВКЛАД АВТОРОВ:

**Копейкин А.Э.** – изучение теоретических источников по проблеме рассматриваемой проблеме, разработка и реализация программы, написание текста статьи;  
**Кузнецов М.Г.** – предоставление материала по исследуемой проблематике, внесение корректив и уточнений в работу, консультирование, редактирование текста.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Авторы заявляют об отсутствии внешних источников финансирования.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Артем Эдуардович Копейкин**, магистр, Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров, Нижегородская обл., Российская Федерация.

e-mail: copeikin.artem92@gmail.com

**Михаил Геннадьевич Кузнецов**, начальник научно-исследовательского отдела, Институт теоретической и математической физики, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Нижегородская обл., Российская Федерация.

e-mail: mihansarov@bk.ru

## AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Kopeikin A.E.** – studying theoretical sources on the subject matter, developing and implementing the program, writing a manuscript;  
**Kuznetsov M.G.** – providing material on the subject under investigation, making corrections and clarifications to the work, supervising, editing the text.

## FUNDING:

The authors state that there are no sources of external funding.

## CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Artyom E. Kopeikin**, Master, Sarov Institute of Physics and Technology – Branch of NRNU MEPHI, Sarov, Nizhny Novgorod region, Russian Federation.  
e-mail: copeikin.artem92@gmail.com

**Mikhail G. Kuznetsov**, Head of the Research Department Institute of Theoretical and Mathematical Physics, Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region, Russian Federation.

e-mail: mihansarov@bk.ru

Поступила в редакцию / Received 01.12.2025

После доработки / Revision 12.02.2026

Принята к публикации / Accepted 17.02.2026

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

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-04>

УДК 621.791: 621.039.5

EDN AEGWDK

Оригинальная статья / Original paper




Опыт применения размагничивания крупногабаритных деталей  
для стабилизации сварочной дуги

М.Е. Жидков<sup>1</sup> , П.А. Меженский<sup>1</sup>, А.Г. Карташов<sup>1</sup>, С.А. Томилин<sup>2</sup>  

<sup>1</sup>Завод «Атоммаш», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация

<sup>2</sup>Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация

 [satomilin@mephi.ru](mailto:satomilin@mephi.ru)

**Аннотация.** В процессе изготовления корпусного толстостенного оборудования на этапе сборки-сварки элементов посредством дуговой сварки (особенно на постоянном токе) приходится решать проблему, связанную с остаточной намагниченностью деталей. При изготовлении корпусов реакторов 3100-Р-101 и 3100-Р-102 на производственной площадке завода «Атоммаш» в г. Волгодонск была зафиксирована высокая остаточная намагниченность заготовок, которая возникает вследствие предшествующих технологических операций, как связанных с термическим и механическим воздействием на металл, так и под действием сильных постоянных магнитных полей, в том числе от протекающего тока. Остаточная намагниченность нарушает стабильность горения дуги, вызывает ее отклонение от оси стыка и приводит к различным дефектам сварочного валика. В сварочной литературе освещались последствия его вредного влияния: от локальных дефектов в виде разбрызгивания, пористости, подрезов и непроваров до полной невозможности формирования сварного шва. Особую сложность вызывает выполнение корневого прохода шва. В статье рассмотрены практические аспекты влияния явления на технологический процесс дуговой сварки реакторного крупногабаритного толстостенного оборудования, причины возникновения намагниченности, применения методики размагничивания, количественный контроль остаточного поля для обеспечения проведения сварочных работ с требуемым качеством. Применение предложенной в настоящей работе практической методики позволяет снизить остаточную намагниченность до 300 нТл даже при очень высоких ее первоначальных значениях (до 1970 нТл), что обеспечивает возможность выполнения сварочных работ любыми дуговыми процессами с высокими показателями качества.

**Ключевые слова:** корпус реактора, остаточная намагниченность, дефект сварного шва, коэрцитивная сила, магнитное поле, сварочный процесс, качество сварного соединения

**Для цитирования:** Жидков М.Е., Меженский П.А., Карташов А.Г., Томилин С.А. Опыт применения размагничивания крупногабаритных деталей для стабилизации сварочной дуги. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(1):34–43. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-04>


**For citation:** Zhidkov M.E., Mezheny P.A., Kartashov A.G., Tomilin S.A. Experience in degaussing large-sized parts to stabilize the welding arc. *Nuclear Safety*. 2026;16(1):34–43. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-04>

Experience in degaussing large-sized parts to stabilize the welding arc

Maxim E. Zhidkov<sup>1</sup> , Pavel A. Mezheny<sup>1</sup>, Alexey G. Kartashov<sup>1</sup>,  
Sergey A. Tomilin<sup>2</sup>  

<sup>1</sup>Atomash, Volgodosk, Rostov Region, Russian Federation

<sup>2</sup>Volgodosk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,  
Volgodosk, Rostov Region, Russian Federation

 [satomilin@mephi.ru](mailto:satomilin@mephi.ru)

**Abstract.** It is necessary to solve the problem of residual magnetization of the parts in the process of manufacturing thick-walled equipment at the stage of assembling and welding elements using arc welding (especially on a direct current). During the production of reactor housings 3100-R-101 and 3100-R-102 at the Atom mash production site in Volgogradsk, a high residual magnetization of the workpieces was recorded, which occurs as a result of previous technological operations, both related to thermal and mechanical effects on the metal, and under the influence of strong permanent magnetic fields, including those caused by the current flowing through them. Residual magnetization disrupts the stability of the arc, causing it to deviate from the axis of the joint and leading to various defects in the weld bead. The welding literature has highlighted the harmful effects of residual magnetization, ranging from local defects such as spatter, porosity, undercuts, and lack of penetration to the complete inability to form a weld bead. The article discusses the practical aspects of the phenomenon's impact on the arc welding process of large-sized thick-walled reactor equipment, the causes of magnetisation, the application of demagnetisation techniques, and quantitative control of the residual field to ensure that welding work is carried out with the required quality. The application of the practical method proposed in this work allows reducing residual magnetisation to 300 nT even at very high initial values (up to 1970 nT), which makes it possible to perform welding operations using any arc processes with high quality indicators.

**Keywords:** reactor vessel, residual magnetization, weld defect, coercive force, magnetic field, welding process

Одной из сложных и труднорешаемых проблем, с которой сталкиваются сварщики на этапе сборки-сварки элементов при дуговой сварке, является остаточная намагниченность деталей, которая нарушает стабильность горения дуги, вызывает ее отклонение от оси стыка и приводит к различным дефектам сварочного валика. У специалистов по сварке данное явление получило название «магнитное дутье» [1]. Изучению этого явления, его влиянию на сварочный процесс и возникновение дефектов, а также решению задачи его нивелирования посвящен целый ряд работ [1–6]. Однако в производстве продолжают возникать еще нерешенные ситуации. В настоящей работе рассмотрена технология размагничивания деталей крупногабаритных корпусных изделий для возможности осуществления сборочно-сварочных операций посредством дуговой сварки.

На производственной площадке завода «Атоммаш» в г. Волгоград выполняется изготовление реакторов 3100-P-101 (рис. 1) и 3100-P-102 комплекса глубокой переработки нефтяного сырья и средних дистиллятов для АО «Новошахтинский завод нефтепродуктов».

Корпуса реакторов, включая все их основные детали – обечайки, днища, патрубки – изготавливаются из поковок стали SA-336M F22V. На внутренней поверхности изделия выполняется антикоррозионная электрошлаковая наплавка типа 309LNb. Фактический химический состав и механи-

ческие свойства SA-336M F22V приведены в таблицах 1 и 2. Материал относится к группе теплоустойчивых сталей, легированных хромом, молибденом и ванадием (например, известны отечественные аналоги сталей этой группы, такие как 15X2MФА, 15X1M1Ф, 12X1MФ и др.). Применение указанного материала обеспечивает для изделия длительную эксплуатацию в условиях высоких температур и нагрузок.



**Рисунок 1.** Реактор 3100-P-101 комплекса глубокой переработки нефтяного сырья и средних дистиллятов для АО «Новошахтинский завод нефтепродуктов»

**Figure 1.** Reactor 3100-R-101 of the deep processing complex for oil raw materials and medium distillates for Novoshakhtinsky Oil Products Plant JSC

**Таблица 1.** Типовой химический состав стали SA-336M F22V**Table 1.** Typical chemical composition of SA-336M F22V steel

Фактический химический состав стали SA-336M F22V											
C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Nb	Ti
0,14	0,56	0,007	0,001	0,05	2,45	1,00	0,17	0,03	0,30	0,03	0,015

**Таблица 2.** Типовые механические свойства стали SA-336M F22V**Table 2.** Typical mechanical properties of SA-336M F22V steel

Механические свойства SA-336M F22V, при 20°C				Работа удара (среднее значение) SA-336M F22V, KCV(Дж) при температуре испытаний, °C	
Предел прочности Rm (МПа)	Предел текучести Rp0.2 (МПа)	Относительное удлинение A (%)	Относительное сужение Z (%)	-18	-29
710	604	24	78	225	198,9

В процессе изготовления после части технологических операций – наплавки, механической обработки и контроля – при выполнении первых сборочных работ сварных соединений в деталях изделия была обнаружена существенная намагниченность, например, при сборке обечайки нижней с большим патрубком (рис. 2). Фактически это проявлялось прилипанием мелких металлических частиц, стружки, а также небольших предметов, например, стальной линейки, обрезков стальной проволоки, связки ключей (рис. 3) и т.д.

**Рисунок 2.** Обечайка с отверстием под установку патрубка**Figure 2.** Shell with a hole for fitting a nozzle

Возникновение эффекта остаточной намагниченности у обечаек не случайность, а закономерный результат всего цикла технологии их обработки. Намагниченность материала может появляться как под действием термической обработки и деформирова-

ния металла, так и под действием сильных постоянных магнитных полей, в том числе от протекающего тока [6]. Пластическая деформация при ковке, механическая обработка кромок и вырезка отверстий, проведение магнитопорошкового контроля (МПК) внутренней поверхности под наплавку, электрошлаковая наплавка (ЭШН) – все эти операции на разных этапах могут приводить

**Рисунок 3.** Намагниченность при сборке под сварку обечайки нижней с большим патрубком**Figure 3.** Magnetization during the assembly of the lower shell for welding with a large the nozzle

материал к значительному намагничиванию. Следует также отметить, что при вырезанном отверстии под патрубок в обечайке (см. рис. 2), наибольшая магнитная сила была отмечена именно в зоне отверстия, что

можно объяснить, как локальным намагничиванием в процессе его вырезки, так и местным искажением магнитного поля в зоне отверстия.

Известна физическая особенность материала изделия, обусловленная химическим составом хромомолибденованадиевой стали и ее структурой, заключающаяся в высокой коэрцитивной силе – материал после намагничивания длительное время может сохранять остаточные магнитные свойства и устойчив к размагничиванию.

Основным способом сварки всех толсто-стенных деталей – сварки кольцевых швов, приварки крупных патрубков – является автоматическая дуговая сварка под слоем флюса на переменном токе или постоянном токе обратной полярности. Для сборки деталей под сварку, приварки временных технологических креплений, сварки малых патрубков применяется ручная дуговая сварка покрытыми электродами на постоянном токе обратной полярности. Все применяемые сварочные процессы, для сварки изделия – дуговые. Намагниченность деталей для них является критичным затруднением, особенно при использовании постоянного тока. В процессе сварки горение дуги может быть нестабильным. Это проявляется в отклонении дуги от нормального симметричного положения, ее вращении, деформации под действием сил остаточного магнитного поля. В итоге нарушается процесс формирования шва [7], защита сварочной ванны, расплавленный металл может ложиться на одну из кромок и не захватывать вторую или ложиться хаотично. Также под действием магнитного поля расплавленный металл может спонтанно выбрасываться из зоны расплава в виде крупных брызг.

Так, в процессе сборки обечайки нижней с большим патрубком (см. рис. 3), где впервые была обнаружена намагниченность деталей при сварке временных технологических креплений, в момент наведения ванны моментально происходил выплеск расплавленного металла из зоны сварки. Применение простых практических мер по снижению эффекта «магнитного дутья» (смена точки подключения обратного провода, в том числе использование несколько точек подвода,

сварка на малом токе максимально короткой дугой и т.д.) [1] должного результата не дали.

Для оценки величины намагниченности деталей [8] были проведены многократные измерения магнитной индукции измерителем магнитного поля ИМП-05/2 в зоне будущего сварного шва приварки патрубка. Величина магнитной индукции составила 1120 нТл внутри разделки, и до 1970 нТл вблизи временных креплений.

Изучение опыта современных передовых методик борьбы с «магнитным дутьем» на массивных заготовках, показало, что наибольший и стабильный эффект может быть достигнут только размагничиванием деталей до снижения остаточной намагниченности не более 300–500 нТл. Другие методики локального снижения влияния магнитных сил в зоне сварки, например, с использованием компенсирующих магнитных полей [9], ввиду большой массы металла изделия неэффективны. Размагничивание на практике выполняют либо нагревом детали выше точки Кюри (~740–780 °С), при которой материал теряет свои магнитные свойства, либо использованием достаточно мощного переменного магнитного поля.

Для теплоустойчивых сталей проведение термообработки для размагничивания должно быть крайне ограничено, например, при возможности совмещения с выполнением штатной термической обработки для снятия остаточных сварочных напряжений. На практике такой вариант размагничивания применяется крайне редко. Температура послесварочного отпуска для снятия напряжений для стали SA-336M F22V составляет 700–715 °С, что соответственно, ниже точки Кюри. Следовательно, полного размагничивания не произойдет. В то же время нагрев выше точки Кюри может привести к необратимым изменениям структуры, снижающим механические и жаропрочные свойства стали.

Наиболее экономичным и технологически целесообразным способом размагничивания, обеспечивающим сохранение механических характеристик металла, является помещение объекта в переменное магнитное поле, дезориентирующее положение элементарных магнитов в его теле таким образом, что

их суммарное магнитное поле становится пренебрежимо мало. Для этого переменное магнитное поле должно быть достаточно мощным и охватывать как можно большую зону, прилегающую к шву, в идеальном случае – всю крупногабаритную конструкцию [10,11].

На практике, главным образом при монтаже и ремонте магистральных трубопроводов диаметром до 1420 мм, где размагничивание является неотъемлемой частью технологического процесса,<sup>1,2</sup> [12] применяются специализированные установки для размагничивания: КУДИН 250А, Set Degauss 600 EWM, АУРА-7001-3, НЕВА и другие. Два последних решения обеспечивают в том числе автоматическое размагничивание торцов и стыков труб, а также труб целиком при минимальном участии оператора<sup>1</sup>. Требования по размагничиванию трубопроводов регламентированы нормативными документами<sup>2</sup>.

Согласно руководству по эксплуатации,<sup>1</sup> например, для создания переменного магнитного поля выполняется равномерная намотка силового кабеля на часть трубопровода, 28-30 витков. Клеммы силового кабеля подключаются к источнику питания с переменным напряжением и подается ток. Возникает переменное магнитное поле, роль сердечника выполняет часть трубы. Под действием переменного магнитного поля происходит дезориентация магнитных доменов в металле трубы. Затем мощность источника плавно снижают до нуля. Проверяют итоговый результат измерением остаточного магнитного поля. При необходимости действия повторяют.

<sup>1</sup> НЕВА ТЕХНИКА. Комплексное руководство. Размагничивание труб магистральных трубопроводов в полевых условиях. – 2024 г. – Режим доступа: <https://nevatech.online/razmagnichivanie-trub-neva-tehnika-rukovodstvo.pdf?ysclid=mlgn4p6q6r108152343> (дата обращения: 08.12.2025).

<sup>2</sup> РД 153-39.4-130-2002 Регламент по вырезке и врезке «катушек» соединительных деталей, заглушек, запорной и регулирующей арматуры и подключению участков магистральных нефтепроводов. – Москва, 2003. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data1/41/41407/?ysclid=mlgnaliywp823613488> (дата обращения: 08.12.2025).

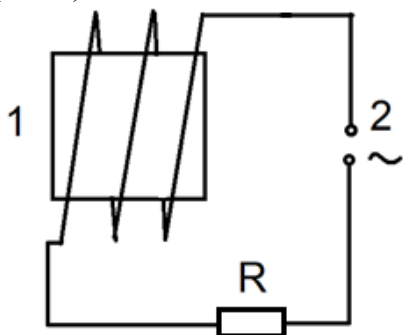
В то же время информации о технической возможности проведения размагничивания габаритных толстостенных изделий и их частей при их изготовлении крайне мало [10,11]. Сложность представляют как конструкция и габариты изделия, так и намотка на трубу диаметром более чем для магистрального трубопровода (свыше 4 м), что не всегда возможно или, как минимум, представляет собой сложную техническую задачу. Также усложняют задачу наличие конструктивных элементов – патрубков, опор, колец и т.д., приварка которых наиболее затруднительна при намагниченности изделия, и огромная ферромагнитная масса изделия, изменение параметров намагниченности которой требует высоких мощностей воздействия, недоступных для рассмотренных выше имеющихся на рынке универсальных решений.

Для более мощного воздействия, при размагничивании габаритных конструкций могут быть использованы, например, более мощные источники переменного тока, например, сварочные источники питания, имеющие функцию сварки переменным током (используется обычно для аргодуговой сварки алюминия) – сварочные трансформаторы (АС) или сварочные выпрямители и инверторы (АС/DC) с номиналом сварочного тока 500А и более. При этом обязательно должна быть возможность плавной регулировки тока.

Для размагничивания отдельных сборок патрубков с обечайкой и блоков обечаек, на производственной площадке завода «Атоммаш» в г. Волгодонск нами был использован сварочный источник ESAB DTU-500 (АС/DC). Кроме того, в комплект оснащения рабочего места размагничивания входили:

1. Реостаты балластные (2 шт.), соединенные параллельно;
2. Сварочный кабель сечением 50–70 мм<sup>2</sup>, необходимой длины из расчета охватываемой площади размагничивания;
3. Токовые клещи для замера действительной величины сварочного тока;
4. Секундомер;
5. Измеритель магнитного поля ИМП-05/2 или аналогичный.

Перед началом работ проводились первичные измерения магнитного поля с определенной периодичностью по всей протяженности шва. Для этого при необходимости может быть подготовлен эскиз детали с обозначением конкретных мест проведения измерений. Все показания прибора фиксируются. Если значения измеренного магнитного поля не превышает 300 нТл – размагничивание не требуется, превышают 300 нТл – рекомендуется провести размагничивание. Электрическая схема для проведения размагничивания представлена на эскизе (рис. 4).



**Рисунок 4.** Электрическая схема подключения катушки к источнику переменного тока для размагничивания: 1 – объект размагничивания; 2 – источник питания переменного тока, R – балластный реостат

**Figure 4.** Electrical diagram of winding connection to an AC source for demagnetization: 1 – demagnetization object; 2 – AC power supply, R – ballast rheostat

Одним из важнейших факторов получения эффективного результата размагничивания является правильный выбор места конструкции, где необходимо выполнить катушку. И если при проведении размагничивания магистрального трубопровода с этим никакой неопределенности нет, т.к. сердечником выступает непосредственно сама труба, то в случае работы с крупным сосудом этот выбор неочевиден.

Рассмотрим сначала сборку кольцевого шва корпуса. Выполнение катушки вокруг всего корпуса (по аналогии с трубопроводом) приведет к очень значительному объему одновременной обработки, т.е. по всей длине кольцевого сварного шва. Для выполнения 10 витков вокруг корпуса потребуется плетть кабель около 150 м массой около 200 кг. И сама катушка на корпус диаметром

4500 мм – непростая технологическая задача. Кроме того, потребуется мощный источник тока, и он будет сильно нагревать кабельную плетть, даже при кратковременном включении. Поэтому был предложен другой вариант – последовательное локальное размагничивание отдельными участками. Сборка под сварку кольцевого шва выполняется на скобах. Скобы устанавливаются примерно через каждый метр шва по его периметру. Если использовать каждую скобу как сердечник для катушки (рис. 5), можно последовательно обработать весь периметр шва. Размагничивание можно выполнять как катушкой каждой скобы в отдельности, так и на серию из 3–5 скоб, расположенных в удобной для доступа нижней части изделия. Далее изделие проворачивается на роликовых опорах, и процедура повторяется. Практика проведения работ показала эффективность принятого решения.



**Рисунок 5.** Пример катушки кабеля на скобу при выполнении размагничивания сборки для сварки технологического шва

**Figure 5.** Example of winding a cable onto a bracket when performing demagnetization of an assembly for welding a process seam

В случае сборки обечайки с патрубком катушка может выполняться как непосредственно на патрубок, так и вглубь разделки под сварку в корпусе, если разделка достаточно глубокая (рис. 6 и 7). Главное требование для катушки – она должна выполняться вокруг поверхности одного из конструктивных элементов таким образом, чтобы часть металла конструкции находилась

непосредственно в контуре намотки. Если подходящих конструктивных элементов нет на конструкции, могут быть использованы дополнительные технологические детали. Только таким образом воздействие переменного магнитного поля будет эффективным.



**Рисунок 6.** Пример намотки кабеля на патрубок для размагничивания при сборке обечайки и патрубка  
**Figure 6.** Example of winding the cable on the nozzle for demagnetization during the assembly of the shell and the nozzle



**Рисунок 7.** Пример намотки кабеля в внутреннюю разделку в корпусе для размагничивания при сборке обечайки и патрубка

**Figure 7.** Example of winding the cable into the internal section in the housing for demagnetization during the assembly of the shell and the nozzle

Опытным путем было установлено, что при параметрах используемого нами источника переменного тока для получения эффекта размагничивания необходимо выполнить не менее 6 витков.

Далее на намотку подается напряжение. Плавно при помощи потенциометра ток

увеличивается до  $500 \pm 50$  А (для DTU-500) и также плавно снижается до нуля. Контроль величины действующего тока можно проводить при помощи токовых клещей или штатного измерительного прибора источника. Время роста и снижения тока, исходя из практики, составляет 2–5 минут для участка длиной  $2000 \pm 100$  мм и толщиной 220 мм.

После отключения напряжения необходимо проверить результат размагничивания с помощью прибора измерения магнитного поля [8]. Для сравнения динамики снижения намагниченности контроль величины магнитного поля выполняется в тех же точках, где проводилось измерение до размагничивания. В случае превышения величины магнитного поля в зоне сварки, процесс размагничивания необходимо повторить. В связи с крупногабаритными деталями, имеющими специфические конструктивные элементы, требуется индивидуальный подход к процессу размагничивания для каждого конкретного случая. В некоторых случаях необходимо изменять конфигурацию намотки и использовать технологические детали, если при повторном воздействии эффект не получен.

Следует также отметить, что после проведения размагничивания, выполнения нагрева под сварку электронагревателями, при измерении магнитного поля непосредственно перед началом сварки, отмечались отдельные случаи превышения рекомендуемого уровня магнитного поля 300–500 нТл. Причиной является наложение дополнительного магнитного поля от проводников электронагревателей. В этом случае рекомендуется после проведения предварительного подогрева нагреватели на время выполнения корневого прохода временно отключать. После завершения корневого прохода влияние магнитного поля на стабильность дуги будет уже минимально.

По рассмотренной в данной работе схеме в настоящее время выполнено размагничивание под сварку семи сборочных единиц двух реакторов. Во всех случаях после выполнения размагничивания по предложенной методике получены положительные результаты, подтвержденные измерениями магнитного поля. Зафиксировано значитель-

ное снижение уровня намагниченности и подтвержден стабильным ведением процесс дуговой сварки с высоким уровнем качества.

### Выводы и рекомендации по применению предложенной методики

1. На основании анализа проведенных измерений определено, что крупногабаритные детали (обечайки, патрубки) для изготовления реактора имеют остаточную намагниченность, зарегистрировано до 1970 нТл, вызванную циклом технологической обработки с применением магнитопорошкового контроля, электрошлаковой наплавки и др., что препятствует стабильному процессу сварки и вызывает различные дефекты в сварном шве. Для реализации дальнейшего технологического процесса остаточная степень намагниченности деталей должна быть не более 300–500 нТл.

2. Подтверждена принципиальная возможность выполнения размагничивания крупногабаритных и толстостенных изделий по существующим принципам размагничивания, применяемым при изготовлении трубопроводов<sup>см.1,2</sup> [12], с разработкой методики, учитывающей особенности габаритов конструкции.

3. Выявлены особенности работы с крупногабаритными и толстостенными конструкциями, в том числе более высокая стойкость к размагничиванию хромомолибденованадиевых сталей, сложность и неэффективность обработки разово больших объемов металла (например, одновременно кольцевого шва по периметру), возможность использования штатных и технологических конструктивных элементов для намотки на них контура локальной обработки.

4. Отработаны практическим путем параметры обработки – время воздействия переменного поля, затухание, требования по намотке контура, принципы и критерии оценки результата размагничивания.

5. Подтверждена высокая эффективность методики обработки деталей переменным магнитным полем даже при очень высоких значениях намагниченности (выполнение сварочных операций на данных деталях вообще не представлялось возможным). После проведения обработки магнитным полем, величина остаточной намагниченности не превышала 300 нТл, выполнение сварочных работ любыми дуговыми процессами стало возможно с высокими показателями качества.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Петров Г.Л. Борьба с магнитным дутьем при сварке постоянным током. *Сварочное производство*. 1978;4:49-51. Режим доступа: <https://bik.sfu-kras.ru/elib/view?id=PRSV-svar/1978/%20Подшивка%20№%201> (дата обращения: 03.12.2025).

Petrov G.L. Combating magnetic blow during DC welding. *Welding Production*. 1978;4:49-51 (in Russ). Available at: <https://bik.sfu-kras.ru/elib/view?id=PRSV-svar/1978/%20Подшивка%20№%201> (accessed: 03.12.2025).

2. Смирнов И.В., Захаренко А.И., Фюссель У. Уменьшение влияния магнитного дутья на пространственное положение дуги при сварке. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2010;12(4):257-261. Режим доступа: <https://sciup.org/read/148205491> (дата обращения: 03.12.2025).

Smirnov I.V., Zakharenko A.I., Füssel U. Reducing the influence of magnetic blow on the spatial position of the arc during welding. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2010;12(4):257-261. (in Russ). Available at: <https://sciup.org/read/148205491> (accessed: 03.12.2025).

3. Киселёв А.С., Гордынец А.С., Дедыух Р.И. Стабилизация процесса дуговой сварки покрытыми электродами при возмущающем действии внешнего магнитного поля. *Вестник науки Сибири*. 2013;4(10):54-60. Режим доступа: <https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/16322/1/570.pdf?ysclid=mlf8gmb6n669688859> (дата обращения: 03.12.2025).

Kiselev A.S., Gordynets A.S., Dedyukh R.I. Stabilization of the arc welding process with coated electrodes under the disturbing action of an external magnetic field. *Science Bulletin of Siberia*. 2013;4(10):54-60. (in Russ). Available at: <https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/16322/1/570.pdf?ysclid=mlf8gmb6n669688859> (accessed: 03.12.2025).

4. Больбот В.К., Новиков Л.Н., Спиридонов В.Д. и др. Способ компенсации магнитного дутья при электродуговой сварке. Патент SU 1318354 А1. Заявл. 31.10.1985. Оpubл. 23.06.1987. Режим доступа: [https://viewer.rusneb.ru/ru/000224\\_000128\\_0001318354\\_19870623\\_A1\\_SU?page=1&rotate=0&theme=white](https://viewer.rusneb.ru/ru/000224_000128_0001318354_19870623_A1_SU?page=1&rotate=0&theme=white) (дата обращения: 04.12.2025).

Bolbot V.K., Novikov L.N., Spiridonov V.D. et al. Method of magnetic blow compensation in electric arc welding. Patent SU 1318354 A1. Claimed 31.10.1985. Published 23.06.1987. (in Russ). Available at: [https://viewer.rusneb.ru/ru/000224\\_000128\\_0001318354\\_19870623\\_A1\\_SU?page=1&rotate=0&theme=white](https://viewer.rusneb.ru/ru/000224_000128_0001318354_19870623_A1_SU?page=1&rotate=0&theme=white) (accessed: 04.12.2025).

5. Корольков П.М. Причины возникновения магнитного дутья при сварке и способы его устранения. *Сварочное производство*. 2004;3:38-40. Режим доступа: <https://elcat.bntu.by/index.php?url=/notices/index/IdNotice:85709/Source:default#> (дата обращения: 04.12.2025).

Korolkov P.M. Causes of magnetic blow during welding and methods for its elimination. *Welding production*. 2004;3:38-40. (in Russ). Available at: <https://elcat.bntu.by/index.php?url=/notices/index/IdNotice:85709/Source:default#> (accessed: 04.12.2025).

6. Добродеев П. Н. Исследование методов размагничивания торцов труб при ремонтах магистральных трубопроводов. *Электротехника и электромеханика*. 2014;3:50-54. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-metodov-razmagnichivaniya-tortsov-trub-pri-remontah-magistralnyh-truboprovodov/viewer> (дата обращения: 03.12.2025).

Dobrodeev P. N. Study of methods for demagnetizing pipe ends during repairs of main pipelines. *Electrical Engineering and Electromechanics*. 2014;3:50-54. (in Russ). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-metodov-razmagnichivaniya-tortsov-trub-pri-remontah-magistralnyh-truboprovodov/viewer> (accessed: 03.12.2025).

7. Гордынец А.С. Управление процессом дуговой сварки при возмущающем воздействии магнитного поля: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.10. Томск, 2012. 16 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005049924?ysclid=mlgmsik3my80953864> (дата обращения: 04.12.2025).

Gordynets A.S. Control of the arc welding process under the disturbing influence of a magnetic field: Abstract of Cand. Sci. (Eng.) thesis: 05.02.10. Tomsk, 2012. 16 p. (in Russ). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005049924?ysclid=mlgmsik3my80953864> (accessed: 04.12.2025).

8. Бакунов А.С., Мужичкий В.Ф. Контроль остаточной намагниченности деталей перед проведением сварочных работ. *Дефектоскопия*. 2004;3:83-85. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17853067&ysclid=mlgmtz4ah6158676637> (дата обращения 11.01.2026).

Bakunov A.S., Muzhitskii V.F. Testing Residual Magnetization of Parts before Welding. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2004;40(3):209-210. <https://doi.org/10.1023/B:RUNT.0000040179.44463.2e>

9. Легуновский А.П., Шаньгин А.М., Стефанский В.А. Магнит компенсационный регулируемый Патент RU 69310 U1. Дата публикации 12.10.2007. Режим доступа: [https://viewer.rusneb.ru/ru/000224\\_000128\\_0000069310\\_20071210\\_U1\\_RU?page=1&rotate=0&theme=white](https://viewer.rusneb.ru/ru/000224_000128_0000069310_20071210_U1_RU?page=1&rotate=0&theme=white) (дата обращения: 04.12.2025).

Letunovsky A.P., Shan'gin A.M., Stefansky V.A. Adjustable compensating magnet by Patent RU 69310 U1. Publication date: 12.10.2007. (in Russ). Available at: [https://viewer.rusneb.ru/ru/000224\\_000128\\_0000069310\\_20071210\\_U1\\_RU?page=1&rotate=0&theme=white](https://viewer.rusneb.ru/ru/000224_000128_0000069310_20071210_U1_RU?page=1&rotate=0&theme=white) (accessed: 04.12.2025).

10. Протосей Н.Е., Лесков Г.И. Устройство для размагничивания толстостенных заготовок перед сваркой. Патент SU 1191950 A1. Дата публикации 15.11.1985. Режим доступа: [https://viewer.rusneb.ru/ru/000224\\_000128\\_0001191950\\_19851115\\_A1\\_SU?page=1&rotate=0&theme=white](https://viewer.rusneb.ru/ru/000224_000128_0001191950_19851115_A1_SU?page=1&rotate=0&theme=white) (дата обращения: 05.12.2025).

Protosey N.E., Leskov G.I. Device for demagnetizing thick-walled workpieces before welding. Patent SU 1191950 A1. Publication date: November 15, 1985. (in Russ). Available at: [https://viewer.rusneb.ru/ru/000224\\_000128\\_0001191950\\_19851115\\_A1\\_SU?page=1&rotate=0&theme=white](https://viewer.rusneb.ru/ru/000224_000128_0001191950_19851115_A1_SU?page=1&rotate=0&theme=white) (accessed: 05.12.2025).

11. Уразбеков Е.И., Гольдштейн А.Е. Устройство размагничивания длинномерных цилиндрических изделий. *Ползуновский вестник*. 2016;2(4):94-97. Режим доступа: [https://journal.altstu.ru/media/f/old2/pv2016\\_04\\_2/pdf/094urazbekov.pdf](https://journal.altstu.ru/media/f/old2/pv2016_04_2/pdf/094urazbekov.pdf) (дата обращения: 05.12.2025).

Urazbekov E.I., Goldstein A.E. Device for demagnetizing long cylindrical products. *Polzunovsky Vestnik*. 2016;2(4):94-97. (in Russ). Available at: [https://journal.altstu.ru/media/f/old2/pv2016\\_04\\_2/pdf/094urazbekov.pdf](https://journal.altstu.ru/media/f/old2/pv2016_04_2/pdf/094urazbekov.pdf) (accessed: 05.12.2025).

12. Гордынец А.С., Дедюх Р.И., Киселёв А.С., Советченко Б.Ф. Способ дуговой сварки. Патент 2245331, МКИ В23К9/09. № 2003134231/02; Заявл. 25.11.2003; Опубл. 27.01.2005; Бюл. №3. Режим доступа: [https://viewer.rusneb.ru/ru/000224\\_000128\\_0002245231\\_20050127\\_C1\\_RU?page=1](https://viewer.rusneb.ru/ru/000224_000128_0002245231_20050127_C1_RU?page=1) (дата обращения: 05.12.2025).

Gordynets A.S., Dedyukh R.I., Kiselev A.S., Sovetchenko B.F. Arc welding method. Patent 2245331, ИК В23К9/09. No. 2003134231/02; Claimed 25.11.2003; Published 27.01.2005; Bull. No. 3. (in Russ). Available at: [https://viewer.rusneb.ru/ru/000224\\_000128\\_0002245231\\_20050127\\_C1\\_RU?page=1](https://viewer.rusneb.ru/ru/000224_000128_0002245231_20050127_C1_RU?page=1) (accessed: 05.12.2025).

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Жидков М.Е.** – постановка задачи, техническое руководство группой исследователей, изучение теоретических источников по проблематике для формирования мероприятий, реализация мероприятий и освоение методик в производстве;

#### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Zhidkov M.E.** – setting the task, technical management of the research team, studying theoretical sources on the subject to form measures, implementing measures, and mastering production techniques;

**Меженский П.А.** – технологическое сопровождение мероприятий по отработке технологии, анализ литературных данных, обработка результатов исследования;

**Карташов А.Г.** – реализация мероприятий в производстве, сбор, анализ и обработка статистических данных измерений, разработка модели и методики обработки;

**Томилин С.А.** – техническое сопровождение мероприятий, сбор и анализ научных публикаций, патентный поиск, проверка результатов, редактирование текста статьи.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Максим Евгеньевич Жидков**, руководитель завода «Атоммаш», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-5563-8242>

e-mail: zhidkov\_me@atom mash.ru

**Павел Александрович Меженский**, главный эксперт по сварке завода «Атоммаш» в г. Волгодонск», Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: mejensky\_pa@atom mash.ru

**Алексей Григорьевич Карташов** инженер-технолог по сварке завода «Атоммаш» в г. Волгодонск», Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: kartashov\_ag@atom mash.ru

**Сергей Алексеевич Томилин**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машиностроения и прикладной механики, заместитель руководителя, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-8661-8386>

e-mail: SATomilin@mephi.ru

**Mezhensky P.A.** – technological support for technology development activities, analysis of literature data, and processing of research results;

**Kartashov A.G.** – implementation of production activities, collection, analysis, and processing of statistical measurement data, development of a model and processing methodology;

**Tomilin S.A.** – technical support for events, collection and analysis of scientific publications, patent search, verification of results, and editing of article text.

#### FUNDING:

The study had no external funding.

#### CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Maxim E. Zhidkov**, Head of the Atom mash, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-5563-8242>

e-mail: zhidkov\_me@atom mash.ru

**Pavel A. Mezhensky**, Chief welding expert Atom mash, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: mejensky\_pa@atom mash.ru

**Alexey G. Kartashov**, Welding technologist Atom mash, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: kartashov\_ag@atom mash.ru

**Sergey A. Tomilin**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, Deputy Head of Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-8661-8386>

e-mail: SATomilin@mephi.ru

Поступила в редакцию / Received 12.12.2025

После доработки / Revision 27.02.2026

Принята к публикации / Accepted 03.03.2026

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

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-05>

УДК 620.187:621.7

EDN EADCIL


Оригинальная статья / Original paper



Оценка возможностей атомно-силовой микроскопии в исследовании  
никелида титана

А.П. Дмитриева<sup>1</sup>  , М.Э. Бузоверя<sup>1,2</sup> 

<sup>1</sup>Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ г. Саров, Нижегородская обл.,  
Российская Федерация

<sup>2</sup>Российский федеральный ядерный центр, Всероссийский научно-исследовательский институт  
экспериментальной физики, г. Саров, Нижегородская обл., Российская Федерация  
 [dmiitr4@yandex.ru](mailto:dmiitr4@yandex.ru)

**Аннотация.** В настоящее время для производства никелида титана нового поколения, обладающего уникальными свойствами памяти формы и сверхэластичности, все чаще применяют метод аддитивных технологий, в частности метод селективного лазерного плавления. Этот подход позволяет создавать изделия сложной геометрической формы, которые практически невозможно получить традиционными методами обработки металлов. Однако, несмотря на очевидные преимущества этого метода, существует острая необходимость в детальном изучении влияния параметров селективного лазерного плавления на формирующуюся микроструктуру, механические свойства и другие характеристики никелидов титана. В качестве образцов для исследования использовались нетравленные полированные микрошлифы никелида титана, полученные методом селективного лазерного плавления. В работе представлены результаты исследования методом атомно-силовой микроскопии особенностей структуры образцов никелида титана до и после термической обработки. Применение данного метода дало возможность получить количественные данные о топографии поверхности с высоким разрешением. Измерены размеры зерен, включений и мартенситных пластин на микро- и наноуровне. Выявлена прямая связь типа структуры с микромеханическими характеристиками, такими как деформация и модуль упругости. Показано, что методология, основанная на атомно-силовой микроскопии с привлечением дополнительных экспериментальных методов и статистической обработкой данных, может быть положена в основу высокоточной диагностики структурно-фазового состояния сплавов. Для атомной отрасли это имеет первостепенное значение, так как позволяет не только дополнять традиционный металлографический анализ, но и получать уникальные данные о поведении материала на наноуровне. Эта информация крайне необходима для обоснования длительной работоспособности изделий в условиях интенсивного ионизирующего излучения и высоких термомеханических нагрузок, обеспечивая тем самым требуемый уровень надежности и безопасности эксплуатации ответственного оборудования.

**Ключевые слова:** атомно-силовая микроскопия, никелид титана, селективное лазерное плавление, эффект памяти формы

**Для цитирования:** Дмитриева А.П., Бузоверя М.Э. Оценка возможностей атомно-силовой микроскопии в исследовании никелида титана. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(1):44–51. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-05>


**For citation:** Dmitrieva A.P., Buzoverya M.E. Evaluation of atomic microscopy potential in the study of titanium nickellides. *Nuclear Safety*. 2026;16(1):44–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-05>

## Evaluation of atomic microscopy potential in the study of titanium nickellides

Anastasia P. Dmitrieva<sup>1</sup>  , Marina E. Buzoverya<sup>1,2</sup> 

<sup>1</sup>*Sarov Institute of Physics and Technology the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Sarov, Nizhny Novgorod region, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Russian Federal Nuclear Center, All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region Russian Federation*

 [dmiitr4@yandex.ru](mailto:dmiitr4@yandex.ru)

**Abstract.** Currently, additive manufacturing techniques, in particular selective laser melting, are increasingly being used to produce a new generation of titanium nickelide with unique shape memory and superelastic properties. This approach allows the creation of products with complex geometric shapes that are virtually impossible to obtain using traditional metalworking methods. However, despite the obvious advantages of this method, there is an urgent need for a detailed study of the influence of selective laser melting parameters on the forming microstructure, mechanical properties, and other characteristics of titanium nickelides. Unetched polished micro-sections of titanium nickelide obtained by selective laser melting are used as samples for the study. The paper presents the results of a study using atomic force microscopy of the structural features of titanium nickelide samples before and after heat treatment. The application of this method made it possible to obtain quantitative data on the surface topography with high resolution. The sizes of grains, inclusions, and martensitic plates are measured at the micro- and nano-levels. A direct correlation between structure type and micromechanical characteristics such as deformation and elastic modulus is identified. It is shown that a methodology based on atomic force microscopy with the use of additional experimental methods and statistical data processing can be used as the basis for high-precision diagnosis of the structural and phase state of alloys. This is of paramount importance for the nuclear industry, as it not only complements traditional metallographic analysis, but also provides unique data on the behavior of materials at the nanoscale. This information is essential for substantiating the long-term operability of products under conditions of intense ionizing radiation and high thermomechanical loads, thereby ensuring the required level of reliability and safety in the operation of critical equipment.

**Keywords:** atomic force microscopy, titanium nickelide, selective laser melting, shape memory effect

### Введение

Никелид титана (TiNi) является перспективным материалом для атомной энергетики благодаря своей способности к «памяти формы» и высокой коррозионной стойкости и прочности. Его применение включает изготовление деталей для активных зон ядерных реакторов и сопутствующего оборудования, так как этот сплав может выдерживать экстремальные условия эксплуатации, обеспечивая надежность и безопасность установок. Отличительная особенность сплава – способность при нагревании восстанавливать форму после пластической деформации – позволяет использовать TiNi для создания систем автоматики, например, предохранительных клапанов, датчиков температуры, замках и робототехнике [1,2].

Уровень служебных свойств никелида титана во многом определяется технологией его получения. К примеру, сформированная в процессе мегапластической деформации кручением в никелиде титана ультрамелкозернистая и субмикроструктурная

структура позволяет повысить комплекс функциональных свойств (с 4,2 до 10,2%) по сравнению с кованными образцами [3,4]. Другим перспективным направлением получения изделий с субмикронной и наноструктурой являются аддитивные технологии (АТ).

Никелид титана, исследованный в данной работе, представляет собой материал нового поколения, так как был получен методом селективного лазерного плавления (СЛП), который является одним из основных методов аддитивных технологий. Механические свойства таких образцов в полной мере определяется фазовыми и структурными превращениями, происходящими в сплаве как непосредственно после синтеза, так и в ходе последующей термообработки. Характерной особенностью титановых сплавов является наличие полиморфных превращений, приводящих к значительным изменениям структуры и свойств в зонах термического воздействия. В случае технологии СЛП высокоэнергетическое лазерное воздействие

приводит к нагреву материала до температур, значительно превышающих точку фазового перехода, с последующим очень быстрым охлаждением. При этом происходит превращение из высокотемпературной  $\beta$ -фазы (аустенит В2) в  $\alpha$ -фазу (мартенсит В19/В19'). Возможны и образования других метастабильных фаз в зависимости от тепловой истории [5,6].

Стремительное развитие аддитивных технологий, основанных на высокоэнергетическом воздействии (таких как селективное лазерное плавление, электронно-лучевая плавка), требует современных подходов к выбору методов диагностики их влияния на структуру и свойства материалов [7–9]. Классическим и хорошо зарекомендовавшим себя методом в этой области является оптическая металлография. Ее возможностей, как правило, достаточно для определения таких характеристик, как средний размер зерна, наличие пор и макронеоднородностей. В дополнении к оптической металлографии, имеющей давнюю историю, в данном исследовании использован современный метод атомно-силовой микроскопии.

Поэтому, целью работы является применение АСМ для исследования структурно-фазового состояния и микромеханических свойств образцов никелида титана, полученных СЛП.

Выбор метода АСМ основан на его уникальных возможностях, позволяющих на одном образце получать комплексную информацию как о топографии поверхности (структуре), так и о локальных механических свойствах на микро- и наноуровне. Это дополняет результаты металлографического анализа и дает принципиально новые данные о материале.

### Образцы и методы исследования

В качестве образцов исследования использовались нетравленные микрошлифы никелида титана (TiNi), изготовленные по 3D-технологии, методом селективного лазерного плавления. Состояние и процентное содержание гафния в образцах представлено в таблице 1.

**Таблица 1.** Образцы исследования<sup>1</sup>

**Table 1.** Study samples

Номер образца	Состояние образцов	% содержания Hf
1	После синтеза, исходное	2,5
2	После синтеза, исходное	5,5
3	Термообработка: нагрев на платформе построения T=850°C	4,0

Образцы исследовались на сканирующем зондовом микроскопе Solver Next производства НТ-МДТ, Россия, г. Зеленоград. Сканирование поверхности проводилось в нескольких модах: в полуконтактной моде (tapping-mode) в режиме топографии и фазы на воздухе при нормальных условиях. Микромеханические свойства снимались в контактной моде методом силовой спектроскопии. В данных измерениях использовались кремниевые кантилеверы серии NSG10/TiN. Обработка изображений проводилась с помощью штатного программного обеспечения «ImageAnalysisP9». Измерения проводились на 3-х образцах по 27 измерений для каждой области.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

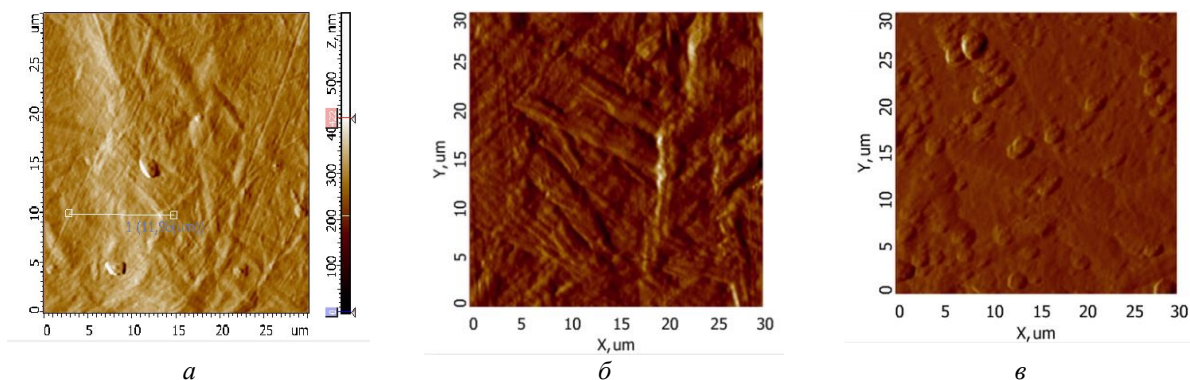
#### Топографические измерения

На рисунке 1 представлены характерные АСМ-изображения поверхности образцов, полученных в режиме топографии. Анализ морфологии поверхности показал, что образцы в исходном состоянии имеют выраженную мартенситную структуру, то есть игольчатую и пластинчатую. После термической обработки структура меняется: появляются области с распадом зерна и с выделением мелкодисперсных частиц. Следует отметить, что даже на нетравленном материале нам удалось визуализировать основные структурные составляющие сплава.

#### Оценка состояния поверхности

Программное обеспечение микроскопа позволяет оцифровывать и измерять структурные параметры материалов. На первом

<sup>1</sup> Образцы были предоставлены специалистами РФЯЦ-ВНИИЭФ (И.В. Пикунин).



**Рисунок 1.** АСМ-изображения поверхности образцов, размер скана 30x30 мкм: *a* – образец 1; *б* – образец 2<sup>1</sup>; *в* – образец 3

**Figure 1.** AFM-image of the samples surface, scan scale 30x30 nm: *a* – sample 1; *b* – sample 2<sup>1</sup>; *c* – sample 3

уровне оценка состояния поверхности образцов проводилась с помощью режима Simple statistic, которая дает возможность измерять параметры микрорельефа поверхности. Результаты, представленные в таблице 2, показали, что на панорамных сканах размером 30x30мкм, разница в значениях шероховатости не обнаружена, а на сканах 5x5мкм образец с пластинчатыми образованиями имеет повышенную шероховатость.

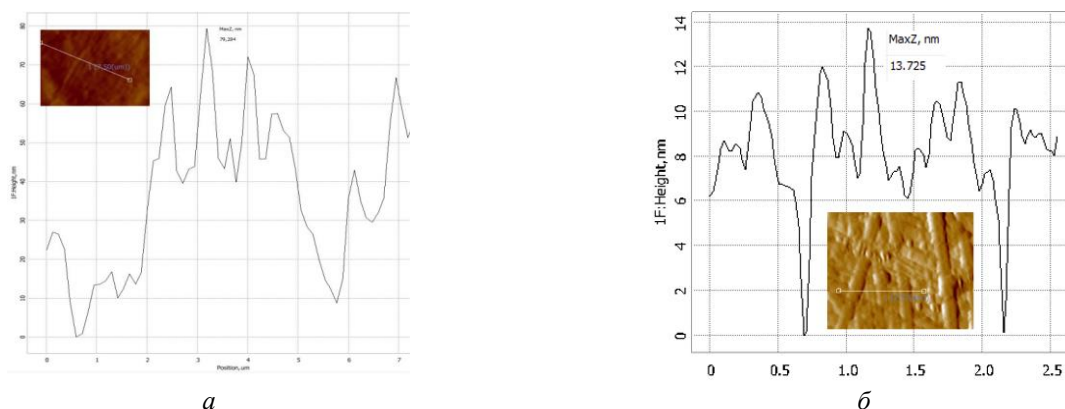
**Таблица 2.** Параметры шероховатости

**Table 2.** Roughness parameters

№ образца	Шероховатость, нм	
	30x30 мкм	5x5 мкм
1	18,173	2,435
2	16,883	6,671
3	15,928	3,880

Следующий этап оценки состояния поверхности образцов проводился с помощью режима Section Analysis, который позволяет провести измерения структурных элементов сплава. Анализ морфологии поверхности образца 1 и профилей сечения показал, что в рамках аустенитных зерен происходит распад с выделением внутри зерна колонии мартенситных игл и  $\alpha$ -фазы по границам. Согласно классификации титановых сплавов по типу структуры образец 1 можно отнести к сплаву с  $\beta$ -превращенной структурой<sup>2</sup>.

На всех сканах разного размера морфология образца 2 имеет пластинчатый тип. Пример измерения структурных элементов представлены на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Профиль сечения с фрагментом АСМ-изображения: *a* – образца 1; *б* – образца 2

**Figure 2.** Section profile with fragment of AFM-image: *a* – sample 1; *b* – sample 2

<sup>1</sup> Рисунок 1б опубликован ранее в статье «Оценка возможностей атомно-силовой микроскопии в исследовании TiNi» сборник трудов конференции «Математика и математическое моделирование», Саров, 09–11 апреля 2025 года. Саров: ООО «Интерконтакт», 2025. 104-105 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82964988> (дата обращения: 20.10.2025)

<sup>2</sup> Меркулова Г.А. Металловедение и термическая обработка цветных сплавов. Учебное пособие, Красноярск, 2007. Режим доступа: <https://bik.sfu-kras.ru/elib/view?id=BOOK1-669.017%3A669.2+%2F.8%2F%D0%9C+540-669860> (дата обращения: 20.10.2025).

На поверхности образца 3 после термической обработки присутствуют области распада мартенсита, которые визуализируются на сканах 10x10мкм (рис. 3). В результате распада мартенсита на границах и в теле зерна наблюдаются мелкодисперсные включения белого цвета. Полученные нами данные согласуются с результатами работы [10],

где подобные структуры идентифицированы как фазы  $TiNi_3$  и  $Ti_2Ni$ . Эти фазы могут упрочнять сплав. Однако, большое количество промежуточных фаз, их неравномерное распределение повышают хрупкость титанового сплава и могут ухудшать их служебные свойства.

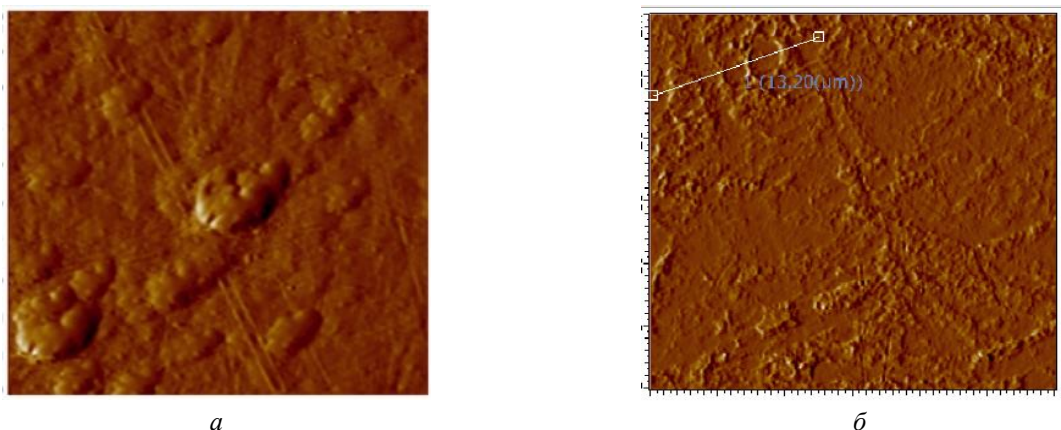


Рисунок 3. Фрагмент АСМ-изображения размером 10x10, образец 3:  $a^3$  – топография;  $b$  – фаза  
Figure 3. Fragment of AFM-image scale 10x10 nm, sample 3:  $a^3$  – topography;  $b$  – phase

Результаты измерений основных структурных элементов образцов 1–3 представлены в таблице 3.

Таблица 3. Средние значения размеров структурных составляющих  $TiNi$

Размер, мкм	Зерно, мкм	Иглы, мкм	Вторичная фаза, мкм
Образец 1			
30x30	2,50	1,00	-
10x10	2,00	0,20	-
5x5	0,50	0,10	-
Образец 2			
30x30	0,65	0,35	-
10x10	0,50	0,13	-
5x5	0,19	0,10	-
Образец 3			
30x30	2,50	-	0,40
10x10	1,50	-	0,15
5x5	0,80	0,10 и ниже	0,10
Литературные данные [9]			
	1,00-6,00	0,10-0,90	0,10-4,20

Результаты измерений основных структурных элементов сплава совпадают с данными литературных источников. Таким образом, образцы в исходном состоянии имеют выраженную мартенситную, то есть пластинчато-игльчатую структуру. После термической обработки  $TiNi$  появляются области с распадом зерна и с выделением частиц вторичных фаз; на низкоразмерных сканах выявляются мартенситные иглы.

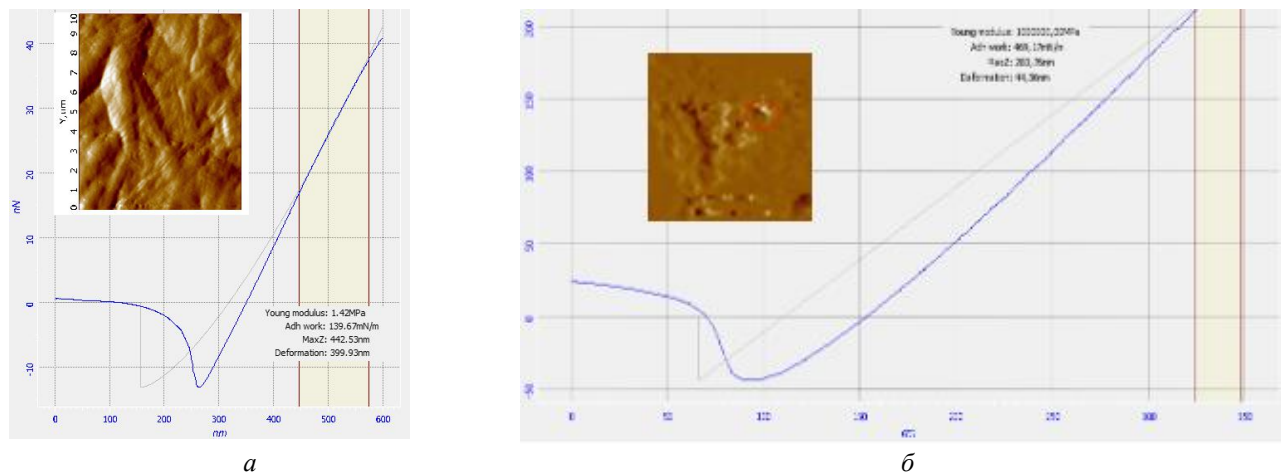
### Измерение микромеханических характеристик

Для практического применения материалов с памятью формы определяющее значение имеет модуль Юнга, обладающий высокой чувствительностью к фазовым переходам [11]. Он позволяет регистрировать переходы и изучать влияние на них различных факторов в основном, модуль Юнга определяют классическим методом из кривых «нагрузка-деформация».

<sup>3</sup> Рисунок 3а опубликован ранее в статье «Оценка возможностей атомно-силовой микроскопии в исследовании  $TiNi$ » сборник трудов конференции «Математика и математическое моделирование», Саров, 09–11 апреля 2025 года. Саров: ООО «Интерконтакт», 2025. 104–105 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82964988> (дата обращения: 20.10.2025)

Методом силовой спектроскопии был получен набор силовых кривых для каждого образца. Измерения позволяют выделить на одном и том же скане области, отличающиеся микромеханическими характеристиками: с высоким модулем Юнга и низкой деформацией; с низким модулем Юнга и высокой

деформацией. Для исходного синтезированного материала модуль Юнга имел низкое значение 1,80 МПа, что указывает на высокую пластичность материала. Для образца после термообработки наблюдался сильный разброс в микромеханических характеристиках (рис. 4).



**Рисунок 4.** Силовые кривые образца 3 с фрагментом области исследования: *a* – модуль Юнга = 1,43 МПа, деформация = 399,93 нм; *б* – модуль Юнга = 1000000 МПа, деформация = 44,36 нм

**Figure 4.** Force curves of the sample 3 with a region fragment: *a* – Young's module = 1,43 МПа, deformation = 399,93 нм; *б* – Young's module = 1000000 МПа, deformation = 44,36 нм

Неоднородность микромеханические характеристики материала после ТО, можно объяснить распадом исходной мартенситной структуры. Для поверхности с зернистой структурой модуль составлял 750–1500 МПа. Область распада с включениями в теле зерна характеризуется повышенным модулем ~650400 МПа и выше. Область с мартенситом имеет низкий модуль ~1,50 МПа. Отмечается, что титановые сплавы с мартенситной структурой обладают высокой пластичностью<sup>2</sup>. При нагреве закаленных титановых сплавов происходит распад мартенсита, который сопровождается выделением промежуточных фаз. Модули упругости наименьшие у сплавов с максимально пересыщенным  $\alpha/\alpha''$ -мартенситом и наибольшие при максимальном количестве промежуточной фазы ( $\omega$ -фаза). Исходя из результатов анализа структуры в режиме фазового контраста (см. рис. 3), видно, что после термообработки распад мартенсита сопровождается выделением большого количество мелких включений.

Можно сделать вывод, что после термической обработки микромеханические харак-

теристики материала становятся неоднородными по поверхности и могут присутствовать разные фазовые составляющие. Выводы предварительные (исследовались нетравленные образцы) и требуют дальнейшего систематического исследования.

### Заключение

В ходе работы на примере никелида титана показана возможность исследования структуры и микромеханических свойств титановых сплавов нового поколения методом АСМ. Рассмотрены особенности титанового мартенсита и структурно-фазовых превращений, происходящих после термообработки сплава на микро- и наномасштабном уровнях.

Показано, что при комплексном исследовании с использованием дополнительных экспериментальных методов и наборе достаточной статистики, на основе АСМ можно отработать методику диагностики структурно-фазового состояния титановых сплавов. Такой подход позволит получить новые данные о материале и дополнить результаты металлографического анализа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Попов Н.Н., Сысоева Т.П., Щедрина Е.В., Пресняков Д.А., Гришин Е.Н. Исследование условий возникновения и реализации эффекта памяти формы в сплаве Ti-Ni-Nb-Zr с целью изучения возможности его использования в устройствах безопасности атомной энергетики. Тезисы докладов Международной конференции «Сплавы с эффектом памяти формы: свойства, технологии, перспективы». Витебск: УО ВГУ. 2014, С. 78-80. Режим доступа: [elibrary\\_49913189\\_99288308.pdf](http://elibrary.49913189_99288308.pdf) (дата обращения: 20.10.2025).

Popov N.N., Sysoeva T.P., Shchedrina E.V., Presnyakov D.A., Grishin E.N. Research of the conditions for the occurrence and realization of the shape memory effect in the Ti-Ni-Nb-Zr alloy in order to study the possibility of its use in safety devices for nuclear energy. Abstracts of the International conference «Shape memory alloys: properties, technologies, and prospects». Vitebsk: Vitebsk state technological university. P. 78-80. (In Russ.). Available at: [elibrary\\_49913189\\_99288308.pdf](http://elibrary.49913189_99288308.pdf) (accessed: 20.10.2025).

2. Сплавский И.С. Коррозионная стойкость никелида титана в атмосферных условиях. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2021;4:45-49. <https://doi.org/10.31857/S0235711921040143>

Splavskiy I.S. Corrosion Resistance of Titanium Nickelide under Atmospheric Conditions. *Journal of machinery manufacture and reliability*. 2021;50(4):319-323. <https://doi.org/10.3103/S1052618821040142>

3. Богатов Ю.В., Щербakov А.В., Щербakov В.А., Ковалева Д.Ю., Сычева А.Е. Синтез никелида титана методом электротеплового взрыва под давлением. *Неорганические материалы*. 2023;59(10):1185-1191. <https://doi.org/10.31857/S0002337X23100019>

Bogatov Y.V., Shcherbakov A.V., Shcherbakov V.A., Kovalev D.Y., Sychev A.E. Pressure-assisted electrothermal explosion synthesis of Titanium Nickelide. *Inorganic materials*. 2023;59(10):1185-1191. <https://doi.org/10.31857/S0002337X23100019>

4. Прочность неоднородных структур – ПРОСТ 2018. Сборник трудов IX-ой Евразийской научно-практической конференции, Москва, 24–26 апреля 2018 года. Москва: ООО «Студио-Принт», 2018. 214 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=34911787&ysclid=mkxvrg93k3376939647> (дата обращения: 20.10.2025)

Strength of inhomogeneous structures – PROST 2018. Collection of papers from the 9th Eurasian scientific and practical conference, Moscow, April 24–26, 2018. Moscow: Studio-Print LLC, 2018. 214 p. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=34911787&ysclid=mkxvrg93k3376939647> (accessed: 20.10.2025).

5. Полякова К.А., Рыклина Е.П., Полесский С.К. Влияние масштабного фактора на мартенситные превращения и механические свойства никелида титана. Сборник материалов «Бернштейновские чтения – 2024», 2024. 152 с. Режим доступа: [https://tmo.misis.ru/docs/2024/tmo\\_2024.pdf](https://tmo.misis.ru/docs/2024/tmo_2024.pdf) (дата обращения: 21.10.2025)

Polyakova K.A., Rykлина E.P., Polesky S.K. Influence of the scale factor on the martensitic transformations and mechanical properties of titanium nickelide: Collection of materials «Bernstein Readings – 2024», 2024. 152p. (In Russ.). Available at: [https://tmo.misis.ru/docs/2024/tmo\\_2024.pdf](https://tmo.misis.ru/docs/2024/tmo_2024.pdf) (accessed: 21.10.2025).

6. Сибирев А.В. Необратимая деформация при многократной реализации эффекта памяти формы в сплаве TiNi. Автореферат диссертации кандидата физико-математических наук. Уфа, 2016. 132 с. Режим доступа: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01005553922?page=1&rotate=0&theme=white> (дата обращения: 22.10.2025).

Sibirev A.V. Irreversible deformation during multiple realizations of the shape memory effect in the TiNi alloy. Dissertation of the candidate of physical and mathematical sciences. Ufa, 2016. 132 p. (In Russ.). Available at: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01005553922?page=1&rotate=0&theme=white> (accessed: 22.10.2025).

7. Кунцевич Т.Э. и др. Микроструктура и свойства сплавов на основе никелида титана, полученного закалкой из расплава. *Письма в журнал технической физики*. 2014. С. 88-94. Режим доступа: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/27425> (дата обращения: 22.10.2025).

Kuntsevich T.E. et al. Microstructure and properties of nickelide-titanium alloys obtained by melt quenching. *Letters to the Journal of Technical Physics*. 2014. P. 88-94. (In Russ.). Available at: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/27425> (accessed: 22.10.2025).

8. Шишковский И.В. и др. Создание объемного изделия из никелида титана методом послойного лазерного плавления. *Письма в журнал технической физики*. 2013. С. 15-24. Режим доступа: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/14679> (дата обращения: 22.10.2025).

Shishkovsky I.V. et al. Creation of a three-dimensional titanium nickelide product by layer-by-layer laser melting. *Letters to the Journal of Technical Physics*. 2013. P. 15-24. (In Russ.). Available at: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/14679> (accessed: 22.10.2025).

9. Пескова А.В., Сухов Д.И., Мазалов П.Б. Исследование формирования структуры материала титанового сплава ВТ6, полученного методом аддитивных технологий. *Авиационные материалы и технологии*. 2020;1;58:38–44. Режим доступа: [https://journal.viam.ru/en/system/files/uploads/pdf/2020/2020\\_1\\_5.pdf?ysclid=mjltuwvte489193003](https://journal.viam.ru/en/system/files/uploads/pdf/2020/2020_1_5.pdf?ysclid=mjltuwvte489193003) (дата обращения: 21.10.2025).

Peskova A.V., Sukhov D.I., Mazalov P.B. Research of the formation of the structure of the material of the VT6 titanium alloy obtained by additive technologies. *Aviation Materials and Technologies*. 2020;1;58:38-44. (In Russ.). Available at: [https://journal.viam.ru/en/system/files/uploads/pdf/2020/2020\\_1\\_5.pdf?ysclid=mjltuwvte489193003](https://journal.viam.ru/en/system/files/uploads/pdf/2020/2020_1_5.pdf?ysclid=mjltuwvte489193003) (accessed: 21.10.2025).

10. Пушин В.Г., Прокошкин С.Д., Валиев Р.З. и др. Сплавы никелида титана с памятью формы. Екатеринбург.

бург: УрО РАН, 2006. 438 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19603800&ysclid=mlqxbwvvy4614557750> (дата обращения: 22.10.2025).

Pushin V.G., Prokoshkin S.D., Valiev R.Z. et al. Shape memory nickelide alloys. Yekaterinburg: Ural branch of the Russian academy of sciences, 2006. 438 p. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19603800&ysclid=mlqxbwvvy4614557750> (accessed: 22.10.2025).

11. Казей З.А., Снегирев В.В. Упругие свойства сплавов TiNi с памятью формы с различной термообработкой. *Физика твердого тела*. 2019;61(7):1223-1228. <https://doi.org/10.21883/FTT.2019.07.47828.380>

Kazei Z.A., Snegirev V.V. Elastic Properties of TiNi Shape Memory Alloys Subjected to Various Heat Treatments. *Physics of the solid state*. 2019;61:1163-1168. <https://doi.org/10.1134/S1063783419070151>

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Дмитриева А. П.** – ответственный за проведение эксперимента (исследование методом АСМ), участие в анализе и интерпретации результатов, внесение правок в текст статьи, подготовка финальной версии статьи;

**Бузоверя М. Э.** – руководитель проекта, координация работы, постановка задачи, анализ полученных данных и их интерпретация, проведение литературного отбора, формулировка заключений, внесение правок в текст статьи.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Анастасия Павловна Дмитриева**, лаборант кафедры общетехнических дисциплин и электроники, Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров, Нижегородская обл., Российская Федерация.

<http://orcid.org/0009-0005-1301-8749>

e-mail: dmiiitr4@yandex.ru

**Марина Эдуардовна Бузоверя**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник РФЯЦ-ВНИИЭФ, доцент, Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров, Нижегородская обл., Российская Федерация.

<http://orcid.org/0009-0006-4481-637X>

e-mail: mebuzzoverya@gmail.com

#### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Dmitrieva A. P.** – responsible for conducting the experiment (research using the AFM method), participating in the analysis and interpretation of results, editing the text of the article, and preparing the final version of the article;

**Buzoverya M. E.** – project manager, coordination of work, setting tasks, analysis and interpretation of data, literature review, formulation of conclusions, editing of the article.

#### FUNDING:

The study had no external funding.

#### CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Anastasia Pavlovna Dmitrieva**, laboratory assistant at the Department of General Technical Disciplines and Electronics, Sarov Institute of Physics and Technology the branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», Sarov, Nizhny Novgorod region, Russian Federation.

<http://orcid.org/0009-0005-1301-8749>

e-mail: dmiiitr4@yandex.ru

**Marina Eduardovna Buzoverya**, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher at RFNC-VNIIEF, Associate Professor, Sarov Institute of Physics and Technology the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Sarov, Nizhny Novgorod region, Russian Federation.

<http://orcid.org/0009-0006-4481-637X>

e-mail: mebuzzoverya@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 27.10.2025

После доработки / Revision 11.02.2026

Принята к публикации / Accepted 17.02.2026

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ  
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ  
OPERATION OF FACILITIES  
NUCLEAR INDUSTRY

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-06>

УДК 621.039.4:681.5

EDN OBIXNU

Оригинальная статья / Original paper




Автоматизированный аудит согласованности паспортов процессов  
интегрированной системы управления АЭС

А.А. Мозговой  , О.В. Подоляк

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», г. Нововоронеж,

Воронежская обл., Российская Федерация

 [MozgovoyALA@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:MozgovoyALA@nvnpp1.rosenergoatom.ru)

**Аннотация.** Статья посвящена решению проблемы верификации согласованности процессной модели в интегрированной системе управления (ИСУ) АО «Концерн Росэнергоатом». Несмотря на формализацию деятельности через паспорта процессов, масштаб и динамичность модели, насчитывающей от 50 до 70 различных процессов, приводят к возникновению несогласованностей в межпроцессных взаимодействиях, традиционно выявляемых в ходе ручного аудита. Для автоматизации этого процесса предлагается специализированное программное решение, реализующее двухэтапный алгоритм. На первом этапе выполняется автоматизированный синтаксический парсинг документации и построение формализованной модели в виде ориентированного графа взаимосвязей. На втором этапе проводится алгоритмический аудит модели, основанный на перекрестной проверке соответствия входных и выходных параметров смежных процессов. Результатом работы является структурированный отчет, объективно фиксирующий все выявленные несоответствия. Разработанный инструмент позволяет выявлять противоречия на этапе разработки процессной документации, минимизируя зависимость от субъективного экспертного анализа и существенно повышая общее качество и целостность системы управления. Внедрение данного инструмента позволяет перенести акцент с трудоемкого экспертного анализа на систематический алгоритмический контроль, что значительно повышает качество паспортов процессов на этапе их разработки, способствует целостности интегрированной системы управления (ИСУ) и усиливает надежность управления в атомной энергетике.

**Ключевые слова:** интегрированная система управления, ИСУ, процессная модель, верификация согласованности, автоматизированный аудит, межпроцессные взаимодействия, входы и выходы процессов, паспорта процессов, алгоритмический контроль, качество управленческой документации

**Для цитирования:** Мозговой А.А., Подоляк О.В. Автоматизированный аудит согласованности паспортов процессов интегрированной системы управления АЭС. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(1):52–60. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-06>


**For citation:** Mozgovoi A.A., Podolyak O.V. Automated audit of the consistency of NPP integrated management system process passports. *Nuclear Safety*. 2026;16(1):52–60. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-06>

**Automated audit of the consistency of NPP integrated management system process passports**

Alexei A. Mozgovoi  , Olga V. Podolyak

Novovoronezh Nuclear Power Plant, branch of Rosenergoatom Concern JSC,

Novovoronezh, Voronezh Region, Russian Federation

 [MozgovoyALA@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:MozgovoyALA@nvnpp1.rosenergoatom.ru)

**Abstract.** This article considers the challenge of verifying the consistency of the process model within the integrated management system (IMS) of JSC «Concern Rosenergoatom». Despite the formalization of activities through process passports, the scale and dynamic nature of the model, which comprises 50 to 70 different processes, lead to inconsistencies in inter-process interactions, traditionally identified through manual auditing. To automate this process, a specialized software solution implementing a two-stage algorithm is proposed. The first stage involves automated syntactic parsing of documentation and the construction of a formalized model represented as a directed graph

of interconnections. The second stage conducts an algorithmic audit of the model based on a cross-check of the input and output parameters of related processes for consistency. The outcome is a structured report that objectively records all identified discrepancies. The developed tool enables the detection of contradictions during the development phase of process documentation, minimizing reliance on subjective expert analysis and significantly enhancing the overall quality and integrity of the management system. The implementation of this tool shifts the focus from labor-intensive expert review to systematic algorithmic control, thereby considerably improving the quality of process passports during their creation, strengthening the integrity of the IMS, and enhancing management reliability in the critical field of nuclear power.

**Keywords:** integrated management system, IMS, process model, consistency verification, automated audit, inter-process interactions, process inputs and outputs, process passports, algorithmic control, management documentation quality

## Введение

Деятельность АО «Концерн Росэнергоатом» (далее – Концерн) и его структурных подразделений регламентируется интегрированной системой управления (далее – ИСУ)<sup>1</sup>. Указанная система представляет собой комплекс взаимосвязанных элементов, объединяющих все подсистемы корпоративного управления. В их число входят элементы, обеспечивающие соблюдение требований к видам безопасности согласно Федеральному закону № 170-ФЗ, а также системы менеджмента качества, охраны окружающей среды, физической защиты, профессиональной безопасности и охраны здоровья, энергоэффективности наряду с экономическими, социальными, организационными и кадровыми компонентами. Важнейшим системообразующим принципом ИСУ является безусловный приоритет безопасности в сфере использования атомной энергии. Кроме того, система устанавливает четкую корреляцию между стратегическими целями, миссией, видением, программными документами развития, корпоративными ценностями и фундаментальными основами деятельности Концерна.

Методологическую основу системы управления составляют функциональный и процессный подходы. Если изначально в Концерне применялся строго функциональный подход, базировавшийся на распределении задач между подразделениями, то

впоследствии была обоснована необходимость внедрения процессного подхода ввиду его значительных преимуществ [1]. Согласно процессной парадигме, управление ориентируется на сквозные бизнес-процессы, выполняемые совокупностью подразделений, что позволяет интегрировать разрозненные функции в единые цепочки создания ценности. В результате модернизации система управления Концерна трансформировалась: произошел переход от функциональной к матричной структуре, в которой процессная модель наложена на традиционную организационно-функциональную основу.

С целью конкретизирования вклада каждого подразделения и работника в достижение общего результата деятельности Концерна и филиала, а также реализацию целей, разработана процессная модель, включающая три категории процессов:

- основные – создают продукт (услуги), представляющий ценность для потребителя; формируют такой результат и его потребительские качества, за которые потребитель готов платить;
- обеспечивающие – обеспечивают функционирование инфраструктуры компании; направлены на предоставление необходимых ресурсов, внутренних услуг для прочих процессов, в первую очередь основных;
- процессы управления – нацелены на координацию и интеграцию основных и обеспечивающих процессов путем принятия и контроля реализации управленческих решений.

Процессная модель имеет иерархическую структуру. Каждый нижестоящий уровень иерархии содержит детализацию вышестоящего уровня: процессы содержат наборы

<sup>1</sup> СТО 1.1.1.04.004.1108-2023 Интегрированная система управления АО «Концерн Росэнергоатом». Общие положения, структура, требования. – Гарант.ру. – <https://base.garant.ru/407752302/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/?ysclid=mlfadutaff273881117>

взаимосвязанных подпроцессов, подпроцессы последовательно разбиваются на процедуры, операции и действия. Важность процесса характеризует степень его вклада в достижение стратегических целей компании [2,3].

Процессная модель Концерна отражает его фактическую деятельность, меняется в соответствии со Стратегией развития Концерна, а также отвечает задачам, поставленным для выполнения Госкорпорацией «Росатом» Концерну. Количество процессов в процессной модели Концерна непостоянно, в период с 2017 г. по настоящее время составляет от 50 до 70 процессов. По процессам разработаны, утверждены и введены в действие приказами паспорта. Паспорта процессов ИСУ включают описания процессов, цели процессов, входные и выходные данные, участников процессов и их взаимодействие, используемые ресурсы, показатели, в том числе показатели деятельности в целях безопасности (при наличии) и показатели операционной эффективности, риски и возможности процессов, указания на смежные процессы, заинтересованные стороны, блок-схему процесса.

В результате анализа деятельности предприятий электроэнергетики установлены избыточность, излишняя спецификация, раздробленность, высокая стоимость бизнес-процессов энергопредприятий, обусловленные положением естественных монополистов [4]. Ключевой проблемой, возникающей при сопровождении такой масштабной и динамичной процессной модели, является несогласованность между входами и выходами смежных процессов. Данное несоответствие проявляется, когда выход одного процесса, задекларированный как вход для другого, не находит подтверждения в паспорте процесса-потребителя. Такие рассогласования нарушают целостность процессной модели, создают «разрывы» в цепочках создания ценности и выявляются, как правило, только в ходе трудоемких ручных аудитов, что снижает эффективность управления в высокоответственной сфере атомной энергетики. Подобные информационные разрывы могут создать предпосылки для принятия некорректных управленческих решений, что

в конечном счете потенциально влияет на надежность и безопасность эксплуатации энергоблоков.

С каждым годом количество крупных и средних предприятий, применяющих в своей деятельности цифровые технологии, увеличивается [5], поэтому создание инструментов автоматизированного анализа межпроцессных связей представляет особую практическую ценность для повышения надежности систем управления на критически важных объектах.

### Материалы и методы

Формализация процессной модели осуществляется через разработку комплекта документов, включающего паспорта процессов, регламентирующие и методические документы. Документация разрабатывается в соответствии с установленными корпоративными стандартами и положениями о системе управления.

Обязательные элементы регламентации процесса включают:

- показатели процесса (показатели деятельности в целях безопасности, показатели операционной эффективности);
- целевые уровни и границы зон отклонений показателя процесса;
- ролевую структуру (владелец, куратор, методолог);
- параметры входов и выходов процесса;
- идентификацию рисков и возможностей;
- перечень участников и заинтересованных сторон.

Согласованность этих данных является не просто требованием к качеству документации, а фундаментальным условием обеспечения безопасного состояния оборудования и предсказуемости функционирования технологических систем.

Основным документом, содержащим формализованное описание процесса, является паспорт процесса. Для визуального представления последовательности операций разрабатывается графическая модель процесса с использованием специализированного программного обеспечения в соответствии с методическими рекомендациями

по моделированию.

Для решения проблемы несогласованности между входами и выходами процессов было разработано программное решение на Python, реализующее двухэтапный метод автоматизированной верификации.

### Архитектура решения и принципы работы

Разработанное программное решение реа-

лизовано на языке Python и состоит из двух последовательно работающих модулей, выполняющих задачи построения модели и ее верификации.

Модуль `passport_analisys` для построения реестра межпроцессных связей выполняет первичную обработку документации и формирует логическую модель взаимосвязей (рис. 1).



**Рисунок 1.** Блок-схема модуля анализа текста документа

**Figure 1.** Block diagram of the document text analysis module

Его работа осуществляется по следующему алгоритму:

Инициализация и сбор данных. Программа осуществляет рекурсивный обход файлов в указанной директории (`Processes`), формируя перечень всех документов, соответствующих формату `.docx`, которые считаются паспортами процессов. Данный перечень фиксируется в контрольном файле `process_list.txt`.

Для каждого идентифицированного паспорта процесса осуществляется его синтаксический парсинг (синтаксический анализ табличных структур) с использованием библиотеки `python-docx`. Алгоритм последовательно анализирует все таблицы документа, ориентируясь на заголовки столбцов. Критически важным этапом является идентификация столбцов, содержащих семантические метки «Входные» и «Выходные» данные.

Ядром алгоритма является экстракция межпроцессных связей, которая заключается в поиске и верификации ссылок. Для каждого анализируемого процесса (документа `docx_file`) осуществляется проверка против всех других процессов из общего реестра (`processes_list`). Цель проверки – обнаружение наименований других процессов в клетках столбцов «Входы» (индекс 3) и «Выходы» (индекс 4). Для предотвращения циклических ссылок «процесс на самого себя» введено соответствующее логическое условие (`if docx_file != process_name`).

Формирование логической модели. Результатом работы модуля является структурированный файл `in_out_file.txt`. Для каждого процесса в нем последовательно записываются: наименование процесса, список процессов, выходы которых являются входами для данного (входящие связи), список процессов, для которых выходы данного процесса являются входами (исходящие связи).

Таким образом, модуль `passport_analysys` преобразует неструктурированные текстовые данные из таблиц документов в формализованную модель взаимосвязей, которая представляет собой ориентированный граф процессов.

Модуль `In_Out_Checker` для верификации согласованности процессной модели использует созданную модель для проведения автоматического аудита на предмет взаимной согласованности задекларированных связей (рис. 2). Алгоритм его работы заключается в следующем:

1. Загрузка и синтаксический парсинг модели. Модуль загружает данные из файла `in_out_file.txt`, преобразуя текстовые строки в структурированный набор данных, пригодный для алгоритмической обработки. Каждый процесс и его связи представляются в памяти программы в виде элементов массива.

2. Алгоритм перекрестной проверки. Для каждого процесса в системе модуль последовательно проверяет два типа связей:

3. Проверка входов. Для каждого входящего процесса, указанного в разделе входов текущего процесса, алгоритм ищет этот процесс-поставщик в общей модели и проверя-

ет, содержится ли текущий процесс в списке его выходов. Это подтверждает, что выход процесса-поставщика действительно задекларирован как вход для процесса-потребителя.

4. Проверка выходов. Аналогичным образом, для каждого исходящего процесса, указанного в разделе выходов, осуществляется проверка содержится ли текущий процесс в списке входов процесса-потребителя.

Для формирования ведомости несоответствий результаты проверки фиксируются в отчете с временной меткой (`report YYYY-MM-DD HH:MM:SS.txt`). Для каждой проверяемой связи выносится вердикт «Подтверждено» или «Не подтверждено».

В конце работы модуль формирует сводную статистику: общее количество выполненных проверок и количество выявленных ошибок (несогласованных связей). Запуск терминального приложения представлен на рисунке 3.

Было проанализировано 24 паспорта процесса, которые не являются ресурсными и их входы/выходы должны быть отражены в смежных процессах в явном виде.

Все 16 случаев были подвергнуты ручной перепроверке, которая подтвердила корректность работы алгоритма и наличие несогласованности входов/выходов в паспортах процессов. Таким образом, инструмент продемонстрировал 100% точность в выявлении согласованности.

Разработанный метод и программный инструмент верификации прошли успешную апробацию в АО «Концерн Росэнергоатом» и получили положительную оценку. По итогам внедрения решение было признано положительной практикой и рекомендовано к тиражированию на АЭС Концерна.

## Обсуждение

Внедрение разработанного инструмента верификации открывает несколько направлений для дальнейшего развития системы автоматизированного контроля процессной модели:

1. Реализация предиктивного анализа и интеллектуального аудита [6]. Современный этап развития предполагает интеграцию

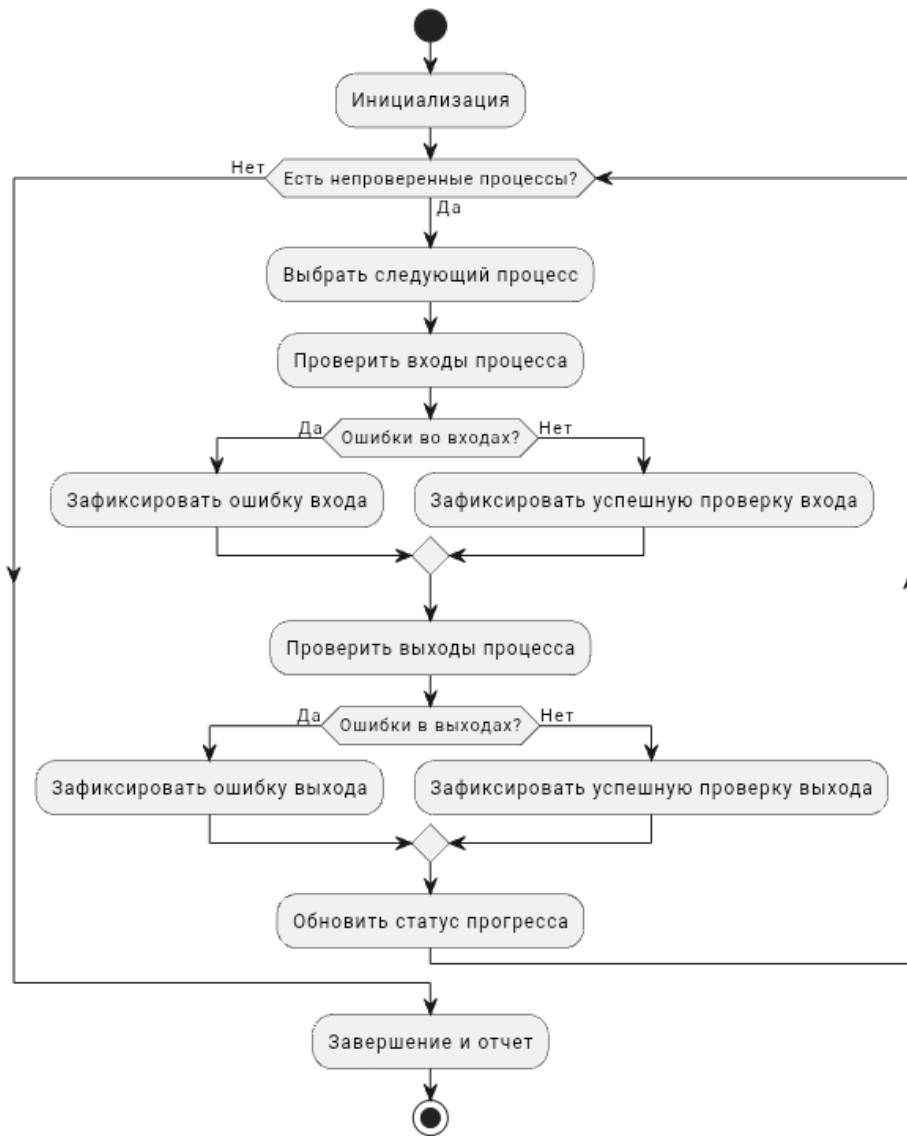


Рисунок 2. Блок-схема модуля верификации согласованности входов и выходов  
 Figure 2. Block diagram of the input and output consistency verification module

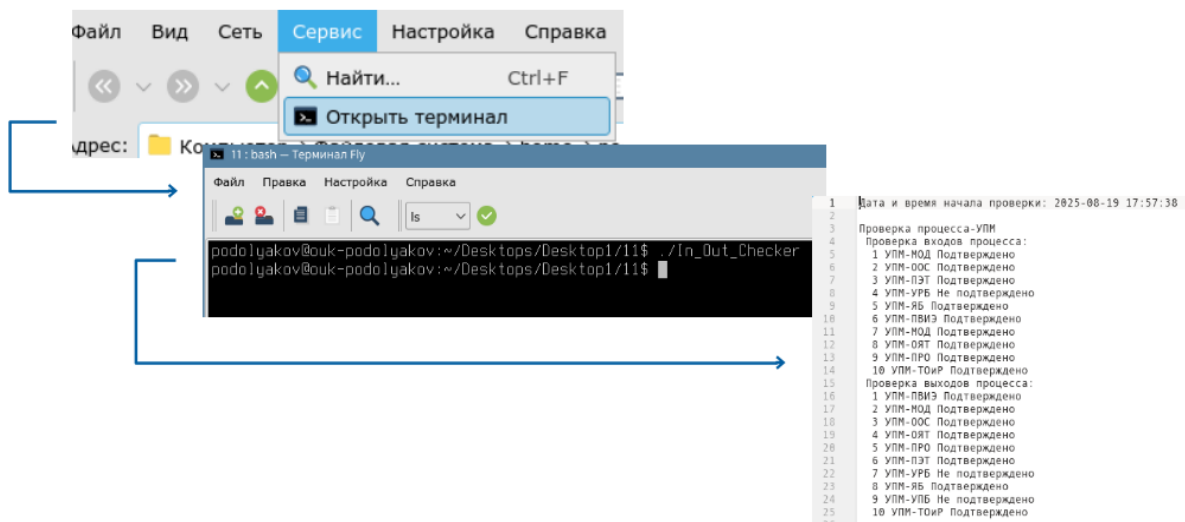


Рисунок 3. Запуск терминального приложения  
 Figure 3. Launching a terminal application

методов машинного обучения для прогнозирования потенциальных несоответствий. Нейросетевые алгоритмы, обученные на исторических данных о выявленных несоответствиях, способны:

- выявлять скрытые паттерны возникновения несогласованностей;
- прогнозировать риски появления новых несоответствий при изменении процессной модели;
- формировать превентивные рекомендации по корректировке паспортов процессов.

2. Разработка системы динамического моделирования процессов. Перспективным направлением является создание интерактивной среды имитационного моделирования, позволяющей:

- оценивать последствия изменений в отдельных процессах для всей системы;
- проводить «стресс-тестирование» процессной модели при различных сценариях развития;
- оптимизировать маршруты межпроцессных взаимодействий.

3. Создание интегрированной платформы управления процессной моделью. Развитие системы в архитектурном аспекте предполагает создание единой платформы, объединяющей:

- редактор паспортов процессов с встроенными шаблонами и валидаторами;
- систему версионного контроля изменений;
- средства визуализации процессных цепочек;
- модуль коллаборативной разработки и согласования.

4. Внедрение онтологического подхода. Для повышения семантической точности анализа целесообразно разработать формальную онтологию предметной области [7], которая позволит:

- установить строгие типы связей между процессами;
- ввести систему аксиом и правил логического вывода;
- реализовать семантический поиск и классификацию процессов.

5. Разработка адаптивной системы мони-

торинга. Система должна обеспечивать конструирование информационных потоков, связывающих стратегический, тактический и оперативный уровни управления [8,9]. Эволюционное развитие инструмента предполагает создание подсистемы непрерывного мониторинга, обеспечивающей:

- автоматический пересчет согласованности при изменении паспортов;
- формирование индекса целостности процессной модели;
- генерацию персонифицированных уведомлений для владельцев процессов.

Реализация указанных направлений позволит перейти от реактивного контроля к проактивному управлению целостностью процессной модели, что особенно актуально для высокодинамичных систем управления в атомной энергетике. Дальнейшие исследования планируется сосредоточить на разработке алгоритмов предиктивной аналитики и создании прототипа интегрированной платформы управления процессной моделью.

### Заключение

Предложен и реализован новый формализованный подход к верификации целостности сложных процессных моделей в области методологии управления бизнес-процессами. В отличие от известных работ, фокусирующихся на моделировании и регламентации процессов, данный подход решает ключевую проблему поддержания их согласованности в динамичной среде. Метод переводит контроль из эпизодического и выборочного ручного аудита в режим автоматизированного, полного и воспроизводимого анализа.

Двухмодульная архитектура обеспечивает четкое разделение ответственности: первый модуль решает задачу преобразования данных, а второй – задачу логического анализа и контроля целостности. Внедрение данного решения позволяет существенно повысить качество паспортов процессов ИСУ на этапе их разработки и снизить количество несоответствий, выявляемых в ходе внутренних и внешних аудитов.

Повышение эффективности организации производства и управления предприятием можно обеспечить за счет активного

внедрения и использования цифровых технологий [10].

Для атомной отрасли это означает не только операционную эффективность, но и укрепление одного из ключевых барьеров на пути возникновения предпосылок к инцидентам – барьера, связанного с четкостью, непротиворечивостью и надежностью управ-

ленческих процедур. Повышая целостность и согласованность ИСУ, разработанный инструмент вносит прямой вклад в усиление надежности управления и, как следствие, в обеспечение безусловного и постоянного приоритета безопасности при использовании атомной энергии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Акылбек уулу Айбек. Процессный подход в модернизации системы менеджмента качества и управлении бизнес-процессами на электроэнергетических предприятиях России. *Ученые записки Российской Академии предпринимательства*. 2023;22(3):39-47. <https://doi.org/10.24182/2073-6258-2023-22-3-39-47>

Akylbek uulu Aibek. Process approach in modernizing the quality management system and managing business processes at Russian electric power plants. *Scientific Notes of the Russian Academy of Entrepreneurship*. 2023;22(3):39-47. (In Russ.). <https://doi.org/10.24182/2073-6258-2023-22-3-39-47>

2. Стюфляева Е.В. Методы реинжиниринга бизнес-процессов предприятия в условиях цифровизации. *Современные технологии управления*. 2020;4(93/1):1-12. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48700684&ysclid=mkuydt7azf340760633> (дата обращения: 12.11.2025).

Styuflyayeva E.V. Methods of reengineering enterprise business processes in the context of digitalization. *Modern Management Technologies*. 2020;4(93/1):1-12. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48700684&ysclid=mkuydt7azf340760633> (accessed: 12.11.2025).

3. Хаммер М., Чампи Дж. Реинжиниринг корпорации. Манифест революции (пер. с англ). Москва: Манн, Иванов и Фербер, 2007. 287 с. Режим доступа: <https://archive.org/details/reengineeringcor0000hamm/page/n247/mode/2up> (дата обращения: 12.11.2025).

Hammer M., Champy J. Reengineering the Corporation. Manifesto of the Revolution. Translated from English. Moscow: Mann, Ivanov and Ferber, 2007. 287 p. (In Russ.). Available at: <https://archive.org/details/reengineeringcor0000hamm/page/n247/mode/2up> (accessed: 12.11.2025).

4. Унижаев Н.В. Особенности внедрения нейросетей и систем искусственного интеллекта на предприятиях электроэнергетики. *Вопросы инновационной экономики*. 2023;13(1):215-232. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=52456660&ysclid=mkuz0gzqr289750518> (дата обращения: 14.11.2025).

Unizhaev N.V. Features of implementing neural networks and artificial intelligence systems at electric power industry enterprises. *Issues of Innovative Economy*. 2023;13(1):215-232. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=52456660&ysclid=mkuz0gzqr289750518> (accessed: 14.11.2025).

5. Мишина Ю.А. Цифровизация бизнес-процессов в системе управления предприятием. Цифровизация экономики и общества: проблемы, перспективы, безопасность: Материалы VI международной научно-практической конференции, Донецк, 28 марта 2024 года. Донецк: Цифровая типография, 2024. С. 297-300. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=75176032&ysclid=mkuz4yyiro376903978> (дата обращения: 14.11.2025).

Mishina Yu.A. Digitalization of business processes in the enterprise management system. Digitalization of the economy and society: Problems, prospects and security: Materials of the VI international scientific and practical conference, Donetsk, March 28, 2024. Donetsk: Digital printing house, 2024. P. 297-300. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=75176032&ysclid=mkuz4yyiro376903978> (accessed: 14.11.2025).

6. Hashimzade N., Myles G.D., Rablen M.D. Predictive analytics and the targeting of audits. *Journal of Economic Behavior & Organization*. 2016;124(C):130-145. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2015.11.009>

Zhan T. Classification models of text: a comparative study. IEEE 11th Annual computing and communication workshop and conference (CCWC). NV, USA, 2021. P. 1221-1225. <https://doi.org/10.1109/CCWC51732.2021.9375918>

8. Hashimzade N., Myles G.D., Rablen M.D. Predictive analytics and the targeting of audits. *Journal of Economic Behavior & Organization*. 2026;124:130-145. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2015.11.009>

9. Федорова А.В., Дегтярева К.В., Тихоненко Д.В., Кукарцева С.В. Управление бизнес-процессами и повышение эффективности в рамках АИС для производственных предприятий. *Глобальный научный потенциал*. 2024;158;380-384. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=68517487&ysclid=mkuzewht8y686404676> (дата обращения: 14.11.2025).

Fedorova A.V., Degtyareva K.V., Tikhonenko D.V., Kukartseva S.V. Business process management and efficiency improvement within the framework of AIS for manufacturing enterprises. *Global Scientific Potential*. 2024;158;380-384. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=68517487&ysclid=mkuzewht8y686404676> (accessed: 14.11.2025).

10. Князев В.Р. Разработка бизнес-процесса функционирования информационной системы управления фи-

нансово-экономической устойчивостью промышленного предприятия. *Управленческий учет*. 2024;12:241-247. Режим доступа: <https://uprav-uchet.ru/index.php/journal/article/view/4953?ysclid=mkuzo5dk44557434972> (дата обращения: 14.11.2025).

Knyazev V.R. Development of the business process of the information system for managing the financial and economic stability of an industrial enterprise. *Management Accounting*. 2024;12:241-247. (In Russ.). Available at: <https://uprav-uchet.ru/index.php/journal/article/view/4953?ysclid=mkuzo5dk44557434972> (accessed: 14.11.2025).

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Мозговой А.А.** – формулировка идеи и цели исследования, разработка программного решения и алгоритма обработки;

**Подоляк О.В.** – выявление проблемы для исследования, обработка результатов исследования.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Алексей Александрович Мозговой**, кандидат технических наук, начальник отдела управления качеством, филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0008-4856-6130>

e-mail: MozgovoyAIA@nvnpp1.rosenergoatom.ru

**Ольга Витальевна Подоляк**, инженер 1 категории группы развития ИСУ отдела управления качеством, филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

e-mail: PodolyakOV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Поступила в редакцию / Received 18.11.2025

После доработки / Revision 10.02.2026

Принята к публикации / Accepted 12.02.2026

#### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Mozgovoi A.A.** – formulating the idea and purpose of the research, developing a software solution, and creating an algorithm for processing data;

**Podolyak O.V.** – identifying a research problem and processing the research results.

#### FUNDING:

There is no external funding.

#### CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Alexei A. Mozgovoi**, Cand. Sci (Eng), Head of the Quality Management Department, Novovoronezh Nuclear Power Plant, branch of Rosenergoatom Concern JSC, Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0008-4856-6130>

e-mail: MozgovoyAIA@nvnpp1.rosenergoatom.ru

**Olga V. Podolyak**, category 1 Engineer of the Quality Management Department's ISU Development Group, Novovoronezh Nuclear Power Plant Branch of Rosenergoatom Concern JSC, Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.

e-mail: PodolyakOV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ  
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ  
OPERATION OF FACILITIES  
NUCLEAR INDUSTRY

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-07>

УДК 621.1:621.039.5

EDN PMJIMT


Оригинальная статья / Original paper



Моделирование режимов работы турбоустановки при продлении  
кампании энергоблока ВВЭР-1000

Г.Н. Никитас<sup>1</sup>  , А.А. Лапкис<sup>1,2</sup> , Д.А. Озерный<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация

<sup>2</sup> Ростовская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом» г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация  
 nikitass.gleb@mail.ru

**Аннотация.** Актуальность исследования обусловлена необходимостью минимизации экономических потерь от недовыработки электроэнергии в период продления кампании энергоблоков ВВЭР-1000. Целью работы является анализ эффективности использования режима скользящего давления во втором контуре для высвобождения дополнительной реактивности за счет температурного эффекта и увеличения выработки электроэнергии. Разработана комплексная математическая модель, включающая уравнения баланса реактивности (температурный и мощностной эффекты), уравнения теплового баланса и теплопередачи в парогенераторе, а также уравнение Стодоль-Флюгеля для расхода пара. Моделирование выполнено в САПР United Cycle, где создана и верифицирована тепловая схема турбоустановки К-1000-60/1500-2. Проведена сравнительная оценка трех режимов продления кампании: снижение мощности при постоянном давлении, режим скользящего давления, и комбинированный режим скользящего давления с поэтапным отключением групп подогревателей высокого давления. Моделирование выполнялось для диапазона снижения тепловой мощности реактора, соответствующего периоду продления кампании. Установлено, что применение скользящего давления с отключением ПВД позволяет поддерживать электрическую мощность на более высоком уровне по сравнению с базовым режимом, что обеспечивает значительный дополнительный экономический эффект. При этом выявлен рост влажности пара на выходе турбины, что требует согласования с заводом-изготовителем. Предложен поэтапный график отключения ПВД, обеспечивающий оптимальное ведение режима по критерию максимизации выработки. Внедрение данной технологии наиболее актуально для АЭС, расположенных в южных регионах с более высоким давлением в конденсаторе. Полученные результаты могут быть использованы при разработке эксплуатационной документации и обосновании безопасности продления кампании для энергоблоков ВВЭР-1000.

**Ключевые слова:** реактор, ВВЭР-1000, кампания, запас реактивности, мощностной эффект, температурный эффект, парогенератор, скользящее давление


**Для цитирования:** Никитас Г.Н., Лапкис А.А., Озерный Д.А. Моделирование режимов работы турбоустановки при продлении кампании энергоблока ВВЭР-1000. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(1):61–68. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-07>

**For citation:** Nikitas G.N., Lapkis A.A., Ozerny D.A. Modeling of turbine operating modes of the stretch-out operation for VVER-1000 power unit. *Nuclear Safety*. 2026;16(1):61–68. (In Russ). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-07>

Modeling of turbine operating modes of the stretch-out operation  
for VVER-1000 power unit

Gleb N. Nikitas<sup>1</sup>  , Aleksander A. Lapkis<sup>1,2</sup> , Dmitriy A. Ozerniy<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation

<sup>2</sup> Rostov Nuclear Power Plant – a branch of Rosenergoatom Concern JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation  
 nikitass.gleb@mail.ru

**Abstract.** The relevance of this study is determined by the necessity to minimize economic losses resulting from reduced electricity output during the stretch-out operation of VVER-1000 power units. The objective of the work is to analyze the efficiency of utilizing the sliding pressure mode in the second circuit to release additional reactivity through the temperature effect and to increase electricity generation. A comprehensive mathematical model has been developed, incorporating reactivity balance equations (considering temperature and power effects), heat balance and heat transfer equations for the steam generator, and the Stodola–Flügel equation for steam flow rate. The simulation is performed using the United Cycle CAD system, where the thermal schematic of the K-1000-60/1500-2 turbine unit was created and verified. A comparative assessment of three extended campaign modes is conducted: power reduction at constant pressure, the sliding pressure mode, and a combined sliding pressure mode with staged disconnection of high-pressure heater (HPH) groups. The simulation is carried out for the range of reactor thermal power reduction corresponding to the extended campaign period. It is established that the application of sliding pressure with HPH disconnection allows maintaining a higher level of electrical power compared to the base mode, thereby providing a significant additional economic effect. Concurrently, an increase in exhaust steam moisture content at the turbine outlet is identified, which necessitates coordination with the manufacturer. A staged schedule for HPH disconnection is proposed, ensuring optimal mode management based on the criterion of maximizing power output. The implementation of this technology is most relevant for NPPs located in southern regions characterized by higher condenser pressure. The obtained results can be utilized in the development of operational documentation and the safety justification for extended campaigns of VVER-1000 power units.

**Keywords:** reactor, VVER-1000, campaign, reactivity reserve, power effect, temperature effect, steam generator, sliding pressure

### Актуальность проблемы

В современной эксплуатации энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000 продление топливной кампании является важным инструментом гибкого управления графиком планово-предупредительных ремонтов (ППР) [1]. Стандартный метод продления кампании, основанный на использовании мощностного эффекта реактивности (МЭР) при постоянном давлении свежего пара, сопровождается значительным снижением тепловой мощности реакторной установки – вплоть до 70% от номинала на завершающей стадии режима продления кампании. Прямым следствием такого снижения является недовыработка электроэнергии и существенные экономические потери для атомной станции [2].

Актуальной инженерно-экономической задачей является поиск и обоснование таких режимов продления кампании, которые позволяли бы максимизировать выработку электроэнергии в дополнительный период работы [1]. Перспективным направлением является переход от простого снижения мощности к комбинированному режиму, который наряду с МЭР задействует температурный эффект реактивности (ТЭР) [3]. Это достигается работой энергоблока на скользящем давлении во втором контуре. Снижение давления в парогенераторах и, как след-

ствие, температуры теплоносителя первого контура, высвобождает дополнительную реактивность. Этот запас можно целенаправленно использовать для поддержания тепловой мощности на более высоком уровне [4].

Исторический прецедент успешного применения подобного режима существует: в 1977 и 1986 гг. на блоках Кольской АЭС с ВВЭР-440 была осуществлена опытная эксплуатация со скользящим давлением, что позволило значительно продлить кампанию и получить дополнительную энерговыработку. Ключевой вывод из того опыта заключается в том, что внедрение такого режима требует решения ряда технических вопросов, связанных с перенастройкой защит и проверкой прочности оборудования в измененных температурных условиях, а его обоснование базировалось на возможностях вычислительной техники и методах 1980-х годов.

Для современного, более мощного и сложного энергоблока ВВЭР-1000 необходим новый уровень анализа. Ранее в ВИТИ НИЯУ МИФИ выполнили моделирование РУ ВВЭР-1000 в рамках продления топливной кампании [5], при этом, детальный расчет тепловой схемы не выполнялся. Именно такой расчет является необходимым этапом для количественной оценки прироста выработки, определения оптимальных парамет-

ров снижения давления и мощности, а также для разработки конкретных указаний по безопасной эксплуатации, направленных на минимизацию экономического ущерба от продления кампании [6].

### Методика моделирования

Целью настоящего исследования является анализ эксплуатационных характеристик энергоблока ВВЭР-1000 в режиме продления кампании со скользящим давлением,

оценка его влияния на КПД турбоустановки и определение экономического эффекта.

Составлена расчетная модель турбоустановки К-1000-60/1500-2 АО «Турбоатом» с помощью специализированного отечественного ПО «М Системы» United Cycle, основанного на методе тепловых и материальных балансов [7]. Модель верифицирована для номинального режима, и отражает основное оборудование второго контура (рис 1).

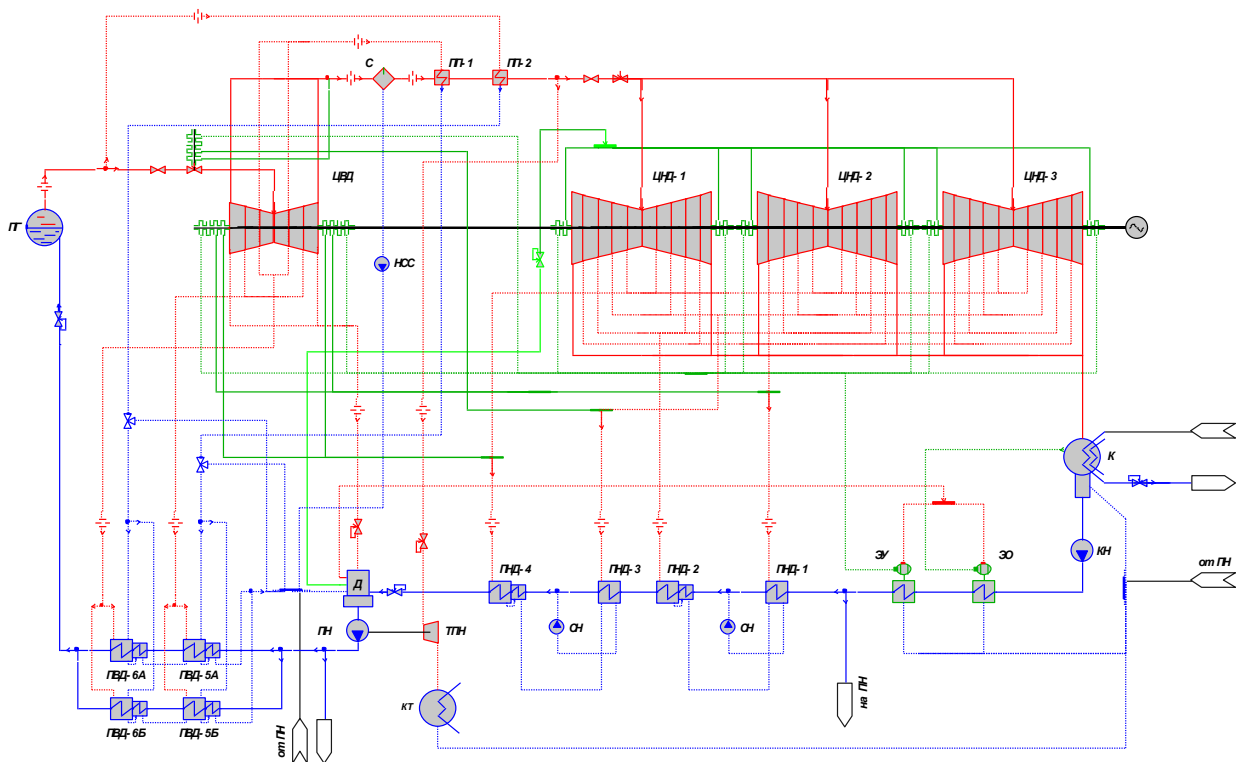


Рисунок 1. Модель турбоустановки К-1000-60/1500-2 в программе United Cycle  
 Figure 1. K-1000-60/1500-2 turbo unit model in the United Cycle program

Основные параметры ядерной энергетической установки (ЯЭУ) и второго контура связаны соотношениями:

- уравнениями теплового баланса и теплопередачи в парогенераторах и активной зоне;
- уравнением Стодольи-Флюгеля для расхода пара турбины [8];
- уравнением баланса реактивности.

Связью между расчетными значениями параметров сред двух контуров будут служить уравнения, характеризующие стационарную теплопередачу, происходящую в парогенераторах, формула (1):

$$\begin{cases} G_{\text{п}} \cdot (h_{\text{п}} - h_{\text{пв}}) = G_{1\text{k}} \cdot (h_{\text{г}} - h_{\text{х}}) \\ G_{\text{п}} \cdot (h_{\text{п}} - h_{\text{пв}}) = KF \cdot \left( \frac{T_{\text{г}} - T_{\text{х}}}{2} - T_{\text{с}} \right), \end{cases} \quad (1)$$

- где  $G_{\text{п}}$  – расход пара;  
 $G_{1\text{k}}$  – расход теплоносителя;  
 $h_{\text{п}}$  – энтальпия пара;  
 $h_{\text{пв}}$  – энтальпия питательной воды;  
 $h_{\text{х}}$  – энтальпия теплоносителя на входе;  
 $h_{\text{г}}$  – энтальпия теплоносителя на выходе;  
 $KF$  – коэффициент теплообмена;  
 $T_{\text{х}}$  – температура теплоносителя на входе;  
 $T_{\text{г}}$  – температура теплоносителя на выходе;  
 $T_{\text{с}}$  – температура теплоносителя воды.

Уравнение Стодолы-Флюгеля в упрощенной форме при неизменном положении СРК можно записать формулой (2):

$$\frac{G_{п0}}{G_{п}} = \frac{p_0}{p}, \quad (2)$$

где  $G_{п0}$  – расход пара (кг/с) на номинальном давлении  $p_0$ , МПа;

$p$  – давление свежего пара перед турбиной, МПа.

Уравнение баланса реактивности определяется формулами (3–4):

$$\Delta\rho_T = \alpha_T \cdot (T_{x2} - T_{x1}), \quad (3)$$

$$\Delta\rho_N = \alpha_N \cdot (N_2 - N_1), \quad (4)$$

где  $\Delta\rho_T$  – температурный эффект реактивности;

$\alpha_T$  – температурный коэффициент реактивности;

$(T_{x2} - T_{x1})$  – изменение температуры «холодной» нитки;

$\Delta\rho_N$  – мощностной эффект реактивности;

$\alpha_N$  – мощностной коэффициент реактивности;

$(N_2 - N_1)$  – изменение тепловой мощности реактора.

Выработка энергии АЭС определяется в значительной мере тепловой экономичностью турбинной установки и второго контура в комплексе. Для дополнительного снижения температуры теплоносителя можно отключать подогреватели высокого давления системы регенерации. Это приведет к снижению температуры питательной воды и, как следствие, к снижению температуры теплоносителя. Такие меры не приведут к повышению экономичности ЯЭУ, но позволят получить дополнительное высвобождение реактивности.

Данная система уравнений была решена при ступенчатом снижении тепловой мощности с 3120 МВт до 2800 МВт. Давление свежего пара снизилось с 64,5 кгс/см<sup>2</sup> до 53,2 кгс/см<sup>2</sup>. Зависимости основных параметров второго контура, от времени продления кампании, полученные при решении системы уравнений приведены на рисунках 2 и 3.

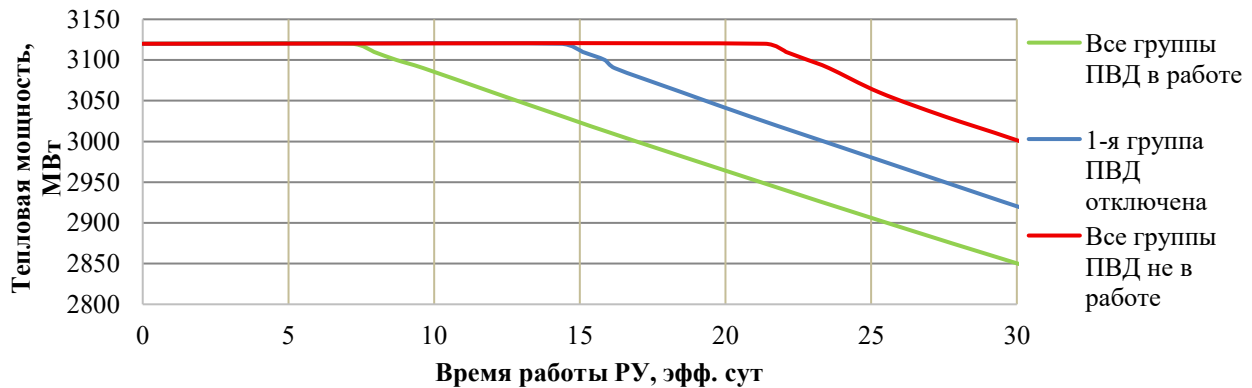


Рисунок 2. Тепловая мощность РУ ВВЭР-1000 в период продления кампании  
Figure 2. Thermal capacity of VVER-1000 during the extended campaign period

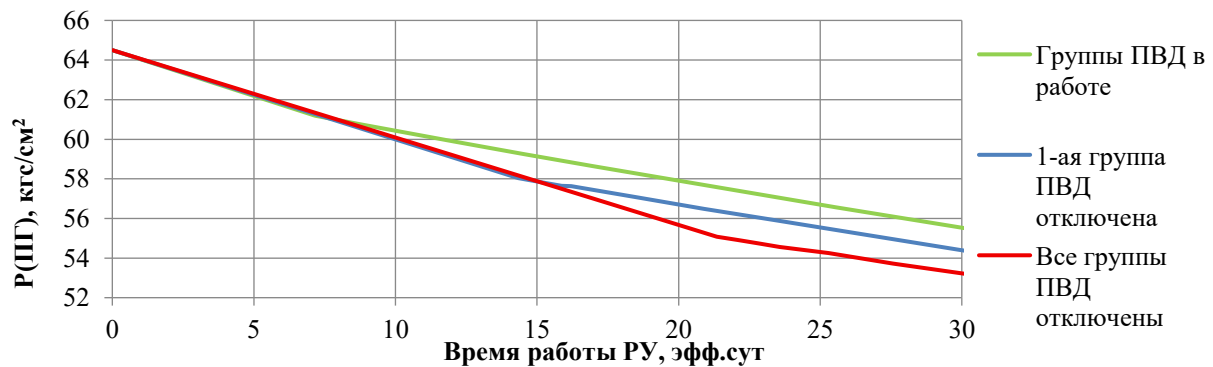
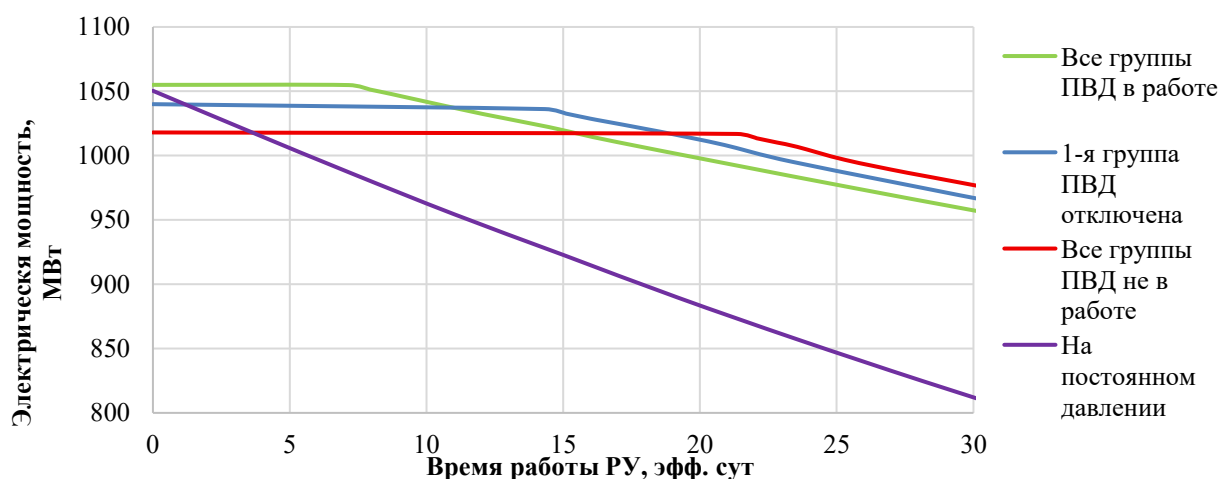


Рисунок 3. Давление свежего пара в ПГ в период продления кампании  
Figure 3. Fresh steam pressure in the ПГ during the campaign extension period

Дальнейшее снижение параметров второго контура, а как следствие, и мощности, потребует перенастройки действующих защит и блокировок технологического оборудования, что может вызвать определенные затруднения при внедрении на действующие блоки ВВЭР-1000.

### Результаты исследования

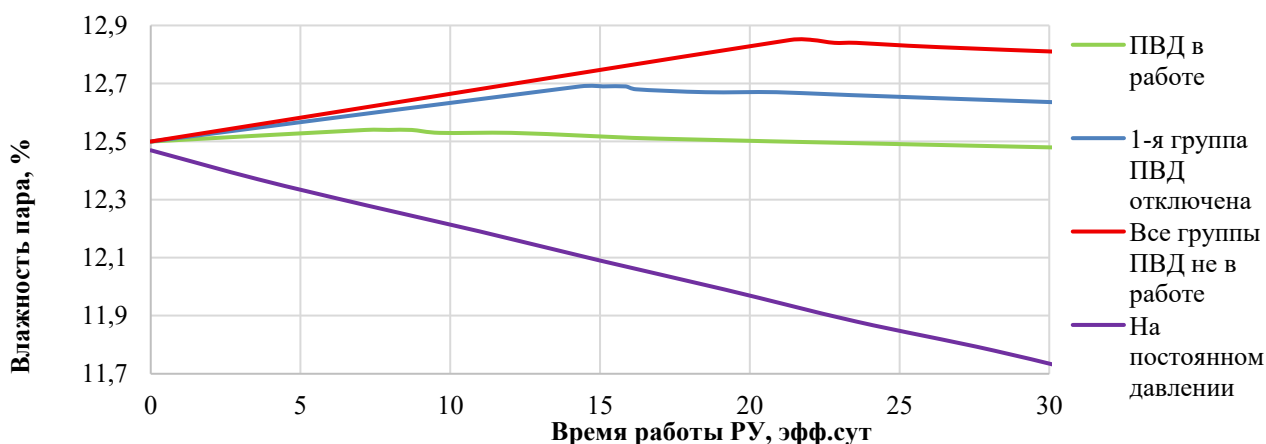
По итогам моделирования на 30-е эффективные сутки продления кампании наибольшую электрическую мощность показал режим на скользящем давлении с отключением всех групп ПВД. Разница с режимом продления кампании при пошаговом снижении мощности составила 185 МВт (рис. 4).



**Рисунок 4.** Электрическая мощность в период продления кампании  
**Figure 4.** Electrical capacity during the campaign extension period

Однако этот эксплуатационный выигрыш сопряжен с существенной технологической платой – повышением влажности пара на выхлопе турбины. Результаты такого моделирования показывают, что при переходе на

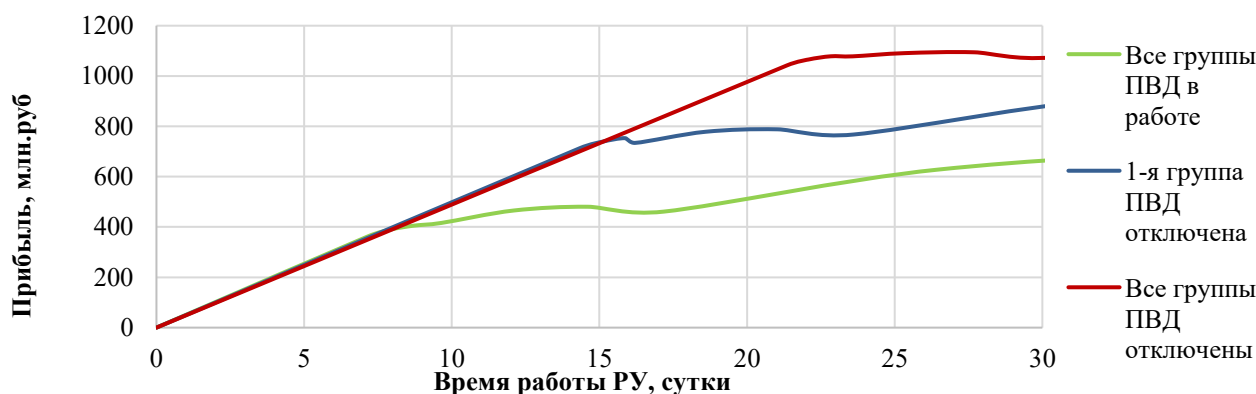
режим скользящего давления влажность на выходе из ЦНД может возрасти с номинальных 12,5 % до 12,85 %, в зависимости от глубины снижения давления (рис. 5)



**Рисунок 5.** Влажность на выхлопе турбины в период продления кампании  
**Figure 5.** Humidity at the turbine exhaust during the campaign extension period

Длительность кампании оказывает заметный эффект на экономическую эффективность блоков АЭС. Высвобождение реактивности за счет температурного эффекта

позволяет увеличить энерговыработку. Выполнен расчет экономического эффекта при средней отпускной оптовой цене электроэнергии 2,0 руб/(кВт·ч) (рис. 6).



**Рисунок 6.** Экономия от продления кампании на скользящем давлении в течении 30 суток  
**Figure 6.** Savings from extending the campaign on sliding pressure for 30 days

Расчеты показывают, что при продолжительности продления кампании на действующих АЭС на 30-е сутки, дополнительный экономический эффект может составлять до 1 млрд. рублей для одного энергоблока ВВЭР-1000 с турбоустановкой К-1000-60/1500-2 за одну кампанию.

### Заключение

По результатам исследования потенциально наиболее эффективным режимом продления кампании является режим на скользящем давлении с отключением двух групп ПВД. Для получения максимального эффекта следует выполнять поэтапное отключение групп ПВД, на 11-е и 19-е эффективные сутки продления кампании, когда давление свежего пара снизится до 60 и 57,3 кгс/см<sup>2</sup> соответственно, максимально поддерживая электрическую мощность (табл. 1).

**Таблица 1.** Оптимальный комбинированный режим  
**Table 1.** Optimal combined mode

Групп ПВД в работе	Давление свежего пара в ПГ, кгс/см <sup>2</sup>	Электрическая мощность турбины, МВт	Эффективные сутки
2	63,5	1055	3
	61,5	1055	6
	61,0	1051	8
	60,0	1036	10
1	59,5	1036	11
	58,2	1036	14
	57,8	1028	16
	57,3	1017	18
0	56,2	1017	19
	54,6	1010	23
	53,7	987	27
	53,2	977	30

Таким образом, режим продления кампании на скользящем давлении с отключением ПВД является потенциально экономически выгодным мероприятием, при условии, что предприятие-производитель разрешит эксплуатацию турбоустановки при росте влажности на выхлопе на 0,2–0,4%. Однако рост влажности может быть менее значителен в летнее время, когда глубина вакуума в конденсаторе снижена. Установлено, что выигрыш в экономичности от применения скользящего давления больше для тех ЯЭУ, у которых выше давление в конденсаторе. Следовательно, вопрос о внедрении скользящего давления пара более актуален для АЭС южных районов, а также для АЭС с градирнями.

Стоит отметить, что данный режим требует дополнительных обоснований возможности работы основного оборудования энергоблока и внесения изменений в регламент безопасной эксплуатации энергоблока, а также в порядок расчета нейтронно-физических характеристик топливных загрузок [3].

Развитие методологии продления топливных кампаний и оптимизации режимов скользящего давления не ограничивается парком энергоблоков ВВЭР-1000. Полученные наработки, модели и, что важнее, системный подход к балансировке экономической выгоды, формируют прочный фундамент для проведения аналогичных и более комплексных исследований для энергоблоков ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Пономаренко Г.Л., Румик А.П. Новая технология маневрирования мощностью ядерного энергетического реактора типа ВВЭР и PWR. *Тяжелое машиностроение*. 2019;(1-2):11-22. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38572342&ysclid=mluq2z8nwq582688226> (дата обращения: 02.10.2025).

Ponomarenko G.L., Rumik A.P. New technology of power maneuvering for nuclear power plant with WWER and PWR type part 1. *Heavy Engineering*. 2019;(1-2):11-22. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38572342&ysclid=mluq2z8nwq582688226> (accessed: 02.10.2025).

2. Браславский Ю.В., Матузаев К.Б., Мерзликин Г.Я., Сукрушев А.В. Анализ экономической целесообразности внедрения длительных топливных циклов на АЭС с ВВЭР-1000. *Энергетические установки и технологии*. 2019;5(1):7-13. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37145005&ysclid=mluq7bmia8983543441> (дата обращения: 02.10.2025).

Braslavsky Yu.V., Matuzayev K.B., Merzlikin G.Ya., Sukrushev A.V. Analysis of the economic feasibility of implementing long fuel cycles at NPPs with VVER-1000. *Power Plants and Technologies*. 2019;5(1):7-13. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37145005&ysclid=mluq7bmia8983543441> (accessed: 02.10.2025).

3. Джарум Б., Соловьев Д.А., Семенов А.А., Щукин Н.В., Выговский С.Б., Аль-Шамайлах А.И., Танаш Х.А. Влияние температурного регулирования при работе ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 в режиме следования за нагрузкой. *Вестник НИЯУ МИФИ*. 2020;9(3):201-209. Режим доступа: <https://vestnikmephi.elpub.ru/jour/article/view/84/70?ysclid=mluq8seh8r644686969> (дата обращения: 02.10.2025).

Jarum B., Solovyov D.A., Semenov A.A., Shchukin N.V., Vygovsky S.B., Al-Shamileh A.I., Tanash Kh.A. Influence of temperature control during operation of VVER-1000 and VVER-1200 in load following mode. *Bulletin of NRNU MEPhI*. 2020;9(3):201-209. (In Russ.). Available at: <https://vestnikmephi.elpub.ru/jour/article/view/84/70?ysclid=mluq8seh8r644686969> (accessed: 02.10.2025).

4. Yang Zhang, Song Yinlei, Tian Wei. Optimal control of stretch-out operation for CPR1000 nuclear power unit. *Nuclear power engineering*. 2022;43(3):144-150. <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2022.03.0144>

5. Грачев А.С., Лапкис А.А., Смолин А.Ю. Возможность продления кампании действующих энергоблоков ВВЭР-1000 за счет работы на скользящем давлении второго контура. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(2):66-76. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-08>

Grachev A.S., Lapkis A.A., Smolin A.Yu. The possibility of extending the campaign of operating VVER-1000 power units by operating at a sliding pressure of the second circuit. *Global nuclear security*. 2023;13(2):66-76 <https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-08>

6. Пономаренко Г.Л., Румик А.П. Патент № 2675380 С1 Российская Федерация, МПК G21C 7/00. Способ маневрирования мощностью ядерного энергетического реактора типа ВВЭР и PWR. Заявка №2018117898 от 15.05.2018; опубл. 19.12.2018. Режим доступа: [https://rusneb.ru/catalog/000224\\_000128\\_0002675380\\_20181219\\_C1\\_RU/](https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002675380_20181219_C1_RU/) (дата обращения: 02.10.2025).

Ponomarenko G.L., Rumik A.P. Patent No. 2675380 C1, Russian Federation, IPC G21C 7/00. Method for manipulating the power of a VVER and PWR nuclear power reactor. Application No. 2018117898, filed on May 15, 2018; published on December 19, 2018. (In Russ.). Available at: [https://rusneb.ru/catalog/000224\\_000128\\_0002675380\\_20181219\\_C1\\_RU/](https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002675380_20181219_C1_RU/) (accessed: 02.10.2025).

7. Romanov S.N., Kutakhov A.G., Romanov K.S. Software united cycle for simulation of static operation modes of power plants. Proc. SPIE 4627, Fifth International Workshop on Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering, (18 February 2002). <https://doi.org/10.1117/12.456288>

8. Самойлович Г.С., Трояновский Г.С. Переменные и переходные режимы в паровых турбинах. Москва: Энергоатомиздат; 1982. 496 с. Режим доступа: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_001093298/?ysclid=mluqibbclw356763517](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001093298/?ysclid=mluqibbclw356763517) (дата обращения: 02.10.2025).

Samoilovich G.S., Troyanovsky G.S. Variable and transient modes in steam turbines. Moscow: Energoatomizdat; 1982. 496 p. (In Russ.). Available at: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_001093298/?ysclid=mluqibbclw356763517](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001093298/?ysclid=mluqibbclw356763517) (accessed: 02.10.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

**Никитас Г.Н.** – разработка и параметризация схемы, формирование текста статьи;

**Лапкис А.А.** – разработка концепции исследования, методических основ исследования;

**Озерный Д.А.** – выполнение исследовательских работ, обработка результатов, формирование текста статьи.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Nikitas G.N.** – development and parameterization of the scheme, drafting the text of the article;

**Lapkis A.A.** – development of the research concept, methodological foundations of the study;

**Ozerny D.A.** – execution of research work, processing of results, drafting the text of the article.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без дополнительных источников финансирования

FUNDING:

No additional funding.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

## CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

## БЛАГОДАРНОСТЬ:

Авторы выражают благодарность разработчику САПР United Cycle – ООО «М системы» – за предоставление программного обеспечения и техническую поддержку.

## ACKNOWLEDGMENTS:

The authors express their gratitude to the developer of the United Cycle CAD system – LLC «M Systems» – for providing the software and technical support.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Глеб Николаевич Никитась**, кафедра атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0008-4736-8984>

e-mail: [nikitas.gleb@mail.ru](mailto:nikitas.gleb@mail.ru)

**Александр Аркадьевич Лапкис**, кандидат технических наук, доцент кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»; ведущий инструктор учебно-тренировочного подразделения, Ростовская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-9431-7046>

e-mail: [AALapkis@mephi.ru](mailto:AALapkis@mephi.ru)

**Дмитрий Александрович Озерный**, кафедра атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0000-4697-3885>

e-mail: [dima-oz.2004@yandex.ru](mailto:dima-oz.2004@yandex.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Gleb N. Nikitas**, Department of Atomic Energy, Volgodosk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodosk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0008-4736-8984>

e-mail: [nikitas.gleb@mail.ru](mailto:nikitas.gleb@mail.ru)

**Aleksandr A. Lapkis**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Atomic Energy, Volgodosk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»; Senior Instructor of the Training Department, Rostov Nuclear Power Plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC, Volgodosk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-9431-7046>

e-mail: [AALapkis@mephi.ru](mailto:AALapkis@mephi.ru)

**Dmitry A. Ozerly**, Department of Atomic Energy, Volgodosk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodosk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0000-4697-3885>

e-mail: [dima-oz.2004@yandex.ru](mailto:dima-oz.2004@yandex.ru)

Поступила в редакцию / Received 29.10.2025

После доработки / Revision 28.01.2026

Принята к публикации / Accepted 03.02.2026

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ  
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ  
OPERATION OF FACILITIES  
NUCLEAR INDUSTRY

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-08>



УДК 681.5:621.165

EDN VOQUKI


Оригинальная статья / Original paper



Опыт модернизации системы автоматического регулирования  
турбины К-1200-6,8/50

В.П. Поваров  , Д.Е. Усачев, А.А. Самодееenko

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», г. Нововоронеж,  
Воронежская обл., Российская Федерация

 [nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru)

**Аннотация.** Статья описывает опыт модернизации электрогидравлической системы автоматического регулирования и защиты (САРЗ) турбоустановки К-1200-6.8/50 на энергоблоке №1 Нововоронежской АЭС-2, выполненной в 2025 г. для повышения надежности, быстродействия и точности регулирования, а также для устранения автоколебаний и нестабильных режимов. Области для модернизации проекта САРЗ были выявлены в ходе тщательного анализа результатов выполнения наладочных работ, при которых периодически возникали автоколебания давления управляющего масла. Так, выполнена замена электрогидравлических преобразователей-сумматоров (ЭПП-С) на электромагнитные преобразователи (ЭМП), на маслопроводах установлены самостабилизаторы давления (ССД). Применением шкафов следящих приводов (ШСП) обеспечена двухканальная система управления регулирующими клапанами с возможностью создания и хранения оперативного технологического архива. Применение сервомоторов регулирующих клапанов без механической обратной связи позволило существенно повысить их быстродействие, а применение электромагнитных преобразователей сервомоторов обеспечило повышение наработки на отказ по сравнению с проектными электрогидравлическими преобразователями. Выполненная модернизация позволила упростить конструкцию САРЗ с существенным сокращением гидравлической составляющей процесса регулирования, что привело к снижению вероятности возникновения автоколебаний в системе регулирования. Сокращение объемов трубопроводов и оптимизация сложной гидросхемы привели не только к повышению быстродействия и точности регулирования частоты вращения турбины, но и к снижению эксплуатационных затрат, а также упрощению технического обслуживания и увеличению срока службы турбинного оборудования за счет минимизации механических колебаний и износа деталей. Модернизированная система автоматического регулирования и защиты турбины К-1200-6.8/50 устойчиво выдерживает заданную электрическую нагрузку, надежно обеспечивая возможность ее плавного изменения.

**Ключевые слова:** турбина, система регулирования и защиты, маслоснабжение, электрогидравлические преобразователи, автоколебания, самостабилизаторы давления


**Для цитирования:** Поваров В.П., Усачев Д.Е., Самодееenko А.А. Опыт модернизации системы автоматического регулирования турбины К-1200-6,8/50. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(1):69–77. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-08>

**For citation:** Povarov V.P., Usachev D.E., Samodeenko A.A. Experience in upgrading the automatic control system of the K-1200-6.8/50 turbine. *Nuclear Safety*. 2026;16(1):69–77. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-08>

Experience in upgrading the automatic control system of the K-1200-6.8/50 turbine

Vladimir P. Povarov  , Dmitry E. Usachev, Alexander A. Samodeenko

Branch of Rosenergoatom Concern JSC, Novovoronezh Nuclear Power Plant, Novovoronezh,  
Voronezh region, Russian Federation

 [nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru)

**Abstract.** The article describes the experience of modernising the electro-hydraulic automatic control and protection system (ACPS) of the K-1200-6 turbine unit. 8/50 at power unit No. 1 of the Novovoronezh NPP-2, carried out in 2025 to improve reliability, speed and accuracy of control, as well as to eliminate self-oscillations and unstable modes. Areas for modernisation of the ACPS project are identified through a thorough analysis of the results of commissioning work, during which self-oscillations of the control oil pressure periodically occurred. Thus, electro-hydraulic transducers-summatoms (EGP-S) are replaced with electromagnetic transducers (EMP), and pressure self-stabilisers are installed on oil pipelines. The use of servo drive cabinets (SDC) provides a two-channel control system for control valves with the ability to create and store an operational technological archive. The use of servo motors for control valves without mechanical feedback has significantly increased their speed, and the use of electromagnetic servo motor converters has increased the mean time between failures compared to the designed electro-hydraulic converters. The modernisation has simplified the design of the ACPS with a significant reduction in the hydraulic component of the control process, which has led to a decrease in the probability of self-oscillations in the control system. The reduction in the volume of pipelines and the optimisation of the complex hydraulic circuit not only increased the speed and accuracy of turbine speed control, but also reduced operating costs, simplified maintenance and increased the service life of the turbine equipment by minimising mechanical vibrations and wear on parts. The modernised automatic control and protection system of the K-1200-6.8/50 turbine stably withstands the specified electrical load, reliably ensuring the possibility of its smooth change.

**Keywords:** turbine, control and protection system, oil supply, electro-hydraulic converters, self-oscillation, pressure self-stabilizers

В проекте Нововоронежской АЭС-2 с турбоустановками К-1200-6.8/50 [1] производства АО «Силовые машины» применена электрогидравлическая система автоматического регулирования и защиты турбины (САРЗ).

Целью данной статьи является описание опыта модернизации САРЗ, направленной на повышение надежности, быстродействия и точности системы, а также устранение нестабильных режимов работы турбины энергоблока № 6 Нововоронежской АЭС.

САРЗ структурно состоит из электронной и гидравлической части. Основными компонентами системы являются:

– система маслоснабжения регулирования (МАХ10), включающая ряд устройств для хранения, очистки и подачи огнестойкого масла в пределах данной турбоустановки;

– гидравлическая часть системы регулирования (ГЧСР), включающая электрогидравлические преобразователи – сумматоры (ЭГП-С) (МАХ51-59AS001), сервомоторы регулирующих и стопорных клапанов турбины, сбросных клапанов и клапана греющего пара сепаратора-пароперегревателя (СПП), электромагнитные выключатели (ЭМВ), золотники отключения турбины (ЗОТ), центробежные выключатели – регулятор безопасности (РБ) и устройства для передачи воздействий на исполнительные механизмы системы регулирования;

– электронная часть системы регулирования (турбинный контроллер), реализующая алгоритмы управления регулируемыми и сбросными клапанами турбины во всех режимах.

Подача огнестойкой жидкости к узлам системы регулирования осуществляется маслонасосом системы регулирования (МНР) по двум напорным коллекторам – стабилизированного и нестабилизированного давления. К коллектору нестабилизированного давления подключены два гидроаккумулятора, предотвращающих снижение давления при кратковременном исчезновении электрического тока. Конструкция узлов защиты турбины позволяет проводить испытания при работе турбины без увеличения частоты вращения. Это достигается с помощью золотника подачи масла (ЗПМ), который направляет масло на бойки регулятора безопасности (РБ) после предварительного вывода рычага регулятора безопасности (РРБ) из зоны воздействия бойка. При этом полностью сохраняется работоспособность второго бойка автомата безопасности турбины.

ЭГП-С [2] предназначены для индивидуального управления сервомоторами регулирующих клапанов. Особенностью системы регулирования турбоустановки К-1200-6,8/50 является реализация обратной связи по управляющим давлениям [3]. САРЗ в со-

ответствии с алгоритмами, заложенными в турбинном контроллере, обеспечивает следующие основные функциональные возможности и характеристики:

- автоматическое поддержание частоты вращения ротора и точное регулирование электрической мощности в соответствии со статической характеристикой и заданием, получаемым из системы автоматического управления энергоблока или от оператора при работе генератора, как в сети, так и на изолированную нагрузку;

- участие в нормированном первичном регулировании частоты и в общем первичном регулировании частоты сети, согласно требованиям директивных документов энергосистемы;

- поддержание заданного давления пара перед турбиной или заданного положения регулирующих клапанов;

- предотвращение недопустимого повышения частоты вращения ротора турбины при сбросах нагрузки с отключением и без отключения генератора от сети и работоспособность турбины в режиме нагрузки собственных нужд и холостого хода;

- защита турбины путем прекращения подачи в нее пара в случае возникновения недопустимых режимов работы (падения давления масла в системе смазки, повышения давления в конденсаторе, осевого сдвига ротора и т.д.);

- возможность изменения нагрузки и синхронизации генератора при любой допустимой частоте в энергосистеме;

- быстрая кратковременная разгрузка турбины и длительное ограничение мощности по сигналам устройств противоаварийной автоматики энергосистемы.

Турбина К-1200-6.8/50 имеет дроссельное парораспределение. Свежий пар подводится к турбине через четыре блока клапанов цилиндра высокого давления (ЦВД), каждый из которых состоит из одного стопорного клапана (СК) поворотного типа и одного регулирующего клапана (РК), которые конструктивно объединены в паровой блок вы-

сокого давления (БПВД). После ЦВД пар направляется в СПП, а затем подводится к цилиндрам низкого давления (ЦНД) через четыре блока клапанов низкого давления (БПНД), каждый из которых состоит из одного стопорного и одного регулирующего клапана поворотного типа. Для регулирования температуры пара после СПП на трубопроводе из линии свежего пара установлен регулирующий клапан греющего пара (РК ГП), который управляет расходом греющего пара, идущего на все четыре СПП. Из линий до СПП в конденсатор идут трубопроводы с установленными на них сбросными клапанами. Стопорные, регулирующие клапаны турбины и клапан греющего пара СПП управляются индивидуальными пружинно-гидравлическими сервомоторами (СМ), открываются под действием давления масла на поршень сервомотора, а закрываются под действием пружин сервомотора. Сбросные клапаны СПП также управляются пружинно-гидравлическими сервомоторами, но закрываются давлением масла, а открываются пружинами. Управление сервомоторами РК турбины, РК ГП и сбросных клапанов осуществляется от ЭГП-С, формирующих выходное управляющее давление к сервомоторам, которое пропорционально управляющему электрическому сигналу от электронной части системы регулирования (ЭЧСР). Для управления каждым сервомотором регулирующего клапана (РК) турбины (четыре РК высокого давления (ВД), четыре РК низкого давления (НД) и РК греющего пара (ГП) установлены индивидуальные электрогидравлические преобразователи-сумматоры (ЭГП-С). Управление турбиной при пуске, синхронизации и работе генератора в сети или на изолированную нагрузку осуществляется воздействием электрических сигналов от ЭЧСР на ЭГП-С, формирующих давление управляющей жидкости к сервомоторам РК турбины и РК ГП.

Принципиальная схема системы регулирования представлена на рисунке 1.

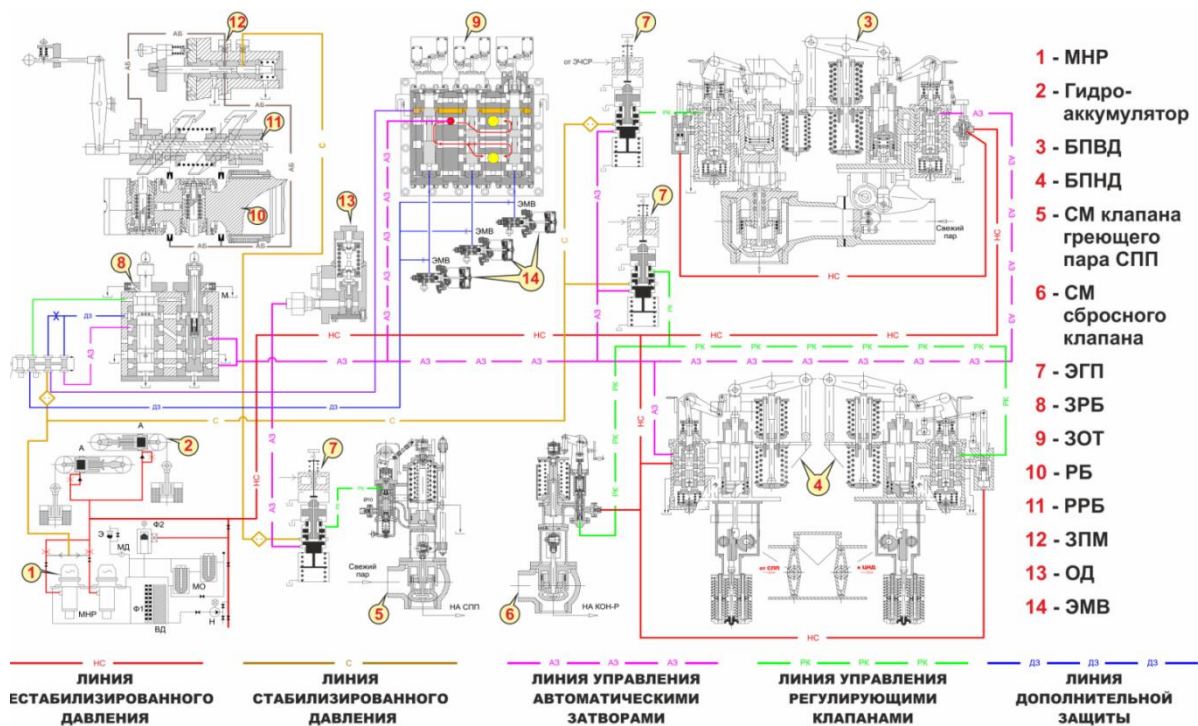


Рисунок 1. Принципиальная схема системы регулирования  
Figure 1. Schematic diagram of the control system

Проектная электрогидравлическая САРЗ турбины К-1200-6,8/50 характеризуется высокой конструктивной сложностью, ограниченной стабильностью и точностью регулирования, а также повышенными требованиями к техническому обслуживанию. Система использует гидравлические усилители и сложные гидросхемы, нуждающиеся в значительном объеме огнестойкого масла и квалифицированном обслуживании. Гидравлические усилители вызывают колебания штоков сервомоторов и резонансные эффекты, что ускоряет износ механических деталей и снижает ресурс элементов парораспределения. Отсутствие самостабилизаторов давления на маслопроводах приводит к нестабильности давления, вибрациям и увеличению риска протечек. Электрогидравлические преобразователи обладают ограниченной чувствительностью и низкой адаптивностью, уступая по быстродействию и надежности современным электромагнитным аналогам. Такая система требует частого обслуживания, сложна в ремонте и модернизации, что должно ограничивать ее применение в современных высокомоощных турбинных установках.

Опыт наладочных работ системы регулирования показал, что основными элемента-

ми, требующими значительного времени на настройку, являются блок регулирования и ЭГП-С [4]. В процессе эксплуатации в системе регулирования турбоустановки К-1200-6,8/50 периодически возникали автоколебания давления управляющего масла. Система регулирования является замкнутой системой, одной из особенностей которой является склонность к неустойчивости. Автоколебательная система [5] – это система, способная генерировать незатухающие колебания, которая включает источник энергии, клапан, регулирующий поступление энергии в колебательную систему, и обратную связь от колебательной системы на клапан. В отличие от собственных и вынужденных колебаний, амплитуда и частота автоколебаний определяются внутренними свойствами самой системы.

Причинами автоколебаний может служить:

- недостаточная демпфирующая способность системы;
- наличие вибрации отдельных частей системы, способствующей износу деталей;
- наличие повышенного трения в элементах системы, таких как промежуточные усилители, золотники сервомоторов.

С целью повышения надежности работы

САРЗ, исключения нестабильных режимов работы на энергоблоке №1 Нововоронежской АЭС-2 выполнена модернизация САРЗ с заменой ЭПП-С на электромагнитные преобразователи (ЭМП) с установкой самостабилизаторов давления на маслопроводах перед регулирующими клапанами.

В результате модернизации сервомоторы РК ВД, РК НД и РК греющего пара СПП выполнены без механической обратной связи. Для управления сервомоторами на их золотниковой части установлены ЭМП, которые управляют перемещением подвижных боек золотниковой части сервомоторов в соответствии с сигналами ЭЧСР.

ЭМП предназначен для преобразования электрических управляющих сигналов, в перемещение выходного штока. Каждый ЭМП управляет положением одного сервомотора РК. Соединение подвижных боек сервомоторов РК НД и РК ГП со штоками ЭМП осуществляется через узел стыковочный (УС) для компенсации несоосности между осью штока ЭМП и осью подвижной буксы сервопривода. Подвижные буксы сервомоторов РК ВД соединяются через модуль форсированного закрытия (МФЗ). МФЗ обеспечивают автоматическое закрытие РК ВД при неисправностях, препятствующих управлению ЭМП, или при обесточивании.

Достигнуто следующее быстродействие сервомоторов:

- собственное время сервомоторов РК ВД на закрытие (при форсированном воздействии) – не более 0,25 с;

- полное время сервомоторов РК ВД на закрытие (с учетом задержек в ГЧСРиЗ и ЭЧСР; при форсированном воздействии) – не более 0,35 с;

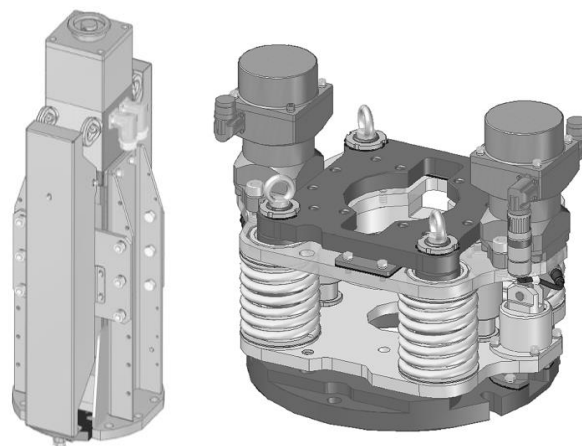
- собственное время сервомоторов РК НД на закрытие (при форсированном воздействии) – не более 0,8 с;

- полное время сервомоторов РК НД на закрытие (с учетом задержек в ГЧСРиЗ и ЭЧСР; при форсированном воздействии) – не более 0,9 с.

ЭМП имеет два электрических канала, каждый из которых включает в себя статор и энкодер. Средняя наработка на отказ ЭМП составляет 100000 ч.

Внешний вид ЭМП, МФЗ приведены на

рисунке 2. Внешний вид ЭМП в сборе с установленным кронштейном теплового экрана и МФЗ представлен на рисунке 3.



**Рисунок 2.** Внешний вид ЭМП, МФЗ  
**Figure 2.** Appearance of electromagnetic transducers



**Рисунок 3.** Общий вид ЭМП в сборе  
**Figure 3.** General view of the assembled electromagnetic transducers

После выполнения модернизации САРЗ демонтирована линия обратной связи, а также механизм расхаживания и золотник ограничителя расхода на РК ВД. Управление РК ВД, синхронизация и изменение нагрузки осуществляются управляющими токовыми сигналами турбинного контроллера на ЭМП, перемещающими подвижную буксу отсечных золотников сервомотора. Нулевой электрический сигнал от турбинного контроллера соответствует полностью закрытым РК ВД, РК НД.

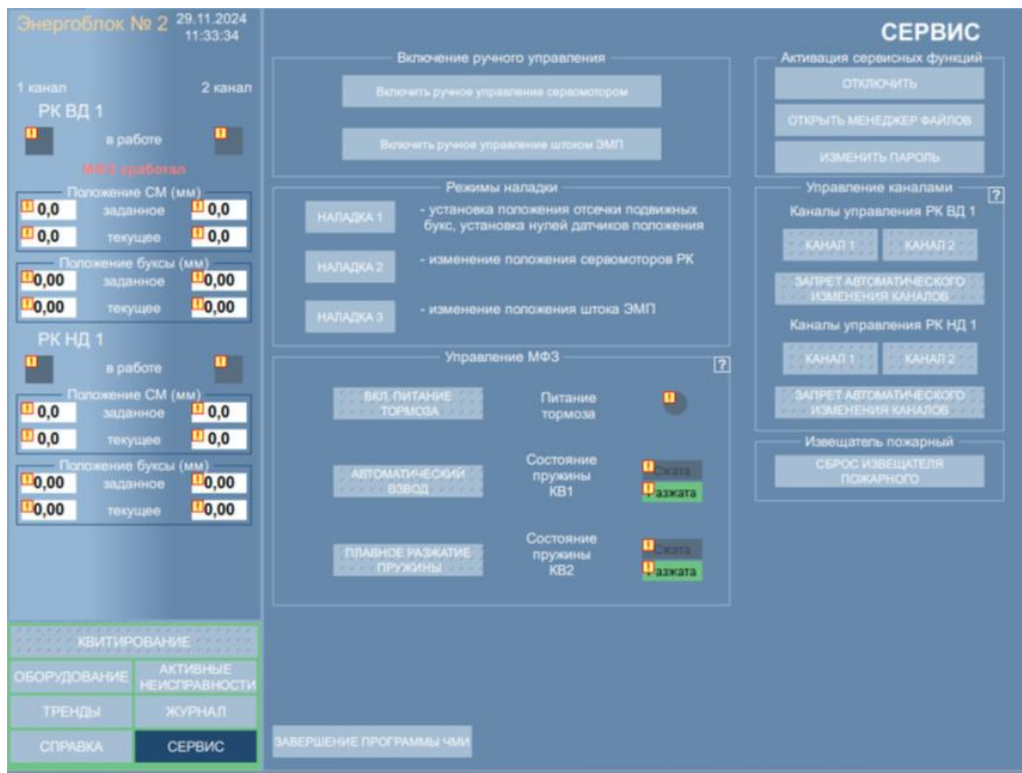
Для управления ЭМП и МФЗ, а также для осуществления взаимодействия с ЭЧСР применяются шкафы следящих приводов (ШСП). ШСП обеспечивает прием и обра-

ботку:

- управляющих сигналов от ПТК ЭЧСР;
- сигналов положения штока ЭМП и положения сервомоторов регулирующих клапанов;
- реализацию алгоритмов позиционеров РК (индивидуальных регуляторов положения РК) и штока ЭМП по положению подвижной буксы сервомотора;
- формирование управляющих воздействий на ЭМП;
- формирование управляющих воздействий на МФЗ;
- диагностирование собственных технических средств;
- регистрацию и архивирование техноло-

гических параметров работы ШСП, ЭМП и МФ.

Для управления регулируемыми клапанами турбинным контроллером подается сигнал на ШСП, после обработки сигнала в ШСП сигнал перенаправляется на ЭМП, после чего ЭМП воздействует на подвижную буксу золотниковой части сервомотора регулирующего клапана. Прием управляющих сигналов от ПТК ЭЧСР осуществляется двумя независимыми каналами ШСП с возможностью диагностики отказа управления. ШСП оборудованы удобным интерфейсом, позволяющим производить местное управление, наладку и диагностику оборудования. Пример интерфейса шкафа ШСП приведен на рисунке 4.



**Рисунок 4.** Пример интерфейса шкафа ШСП  
**Figure 4.** Example of a servo drive cabinet

Для снижения динамических нагрузок от пульсаций давления и гидравлических ударов, действующих на трубопроводы и оборудование до безопасного уровня на линии напорного нестабилизированного давления, линии управления СК и РК, а также линии стабилизированного давления, установлены самостабилизаторы давления (ССД). ССД содержит малую и большую расширитель-

ные камеры, соответствующие демпфирующие камеры, пружину и демпфирующий элемент – поршень. В установившемся режиме рабочая среда заполняет из трубопровода все камеры ССД, при этом давление во всех камерах устанавливается одинаковое, равное давлению в трубопроводе. Появление на входе ССД импульса давления (от гидроудара или вибрации) любого знака и вели-

чины приводит к изменению давления через перфорированные отверстия в малой расширительной камере и в соответствующей части демпфирующей камеры. Взаимодействуя с поршнем, гидроударная волна гасится. Этот же входной импульс с некоторой задержкой по времени попадает в большую расширительную и демпфирующую камеры и действует на поршень с противоположной стороны. Вследствие этого, действие им-

пульса давления поочередно с одной и другой стороны поршня приводит к гашению энергии импульса, возникшего вследствие гидроудара или вибрации энергией этого же импульса. То есть, конструкция стабилизатора давления устроена таким образом, что позволяет разворачивать и перенаправлять импульс навстречу самому себе. Схема установки ССД представлена на рисунке 5.

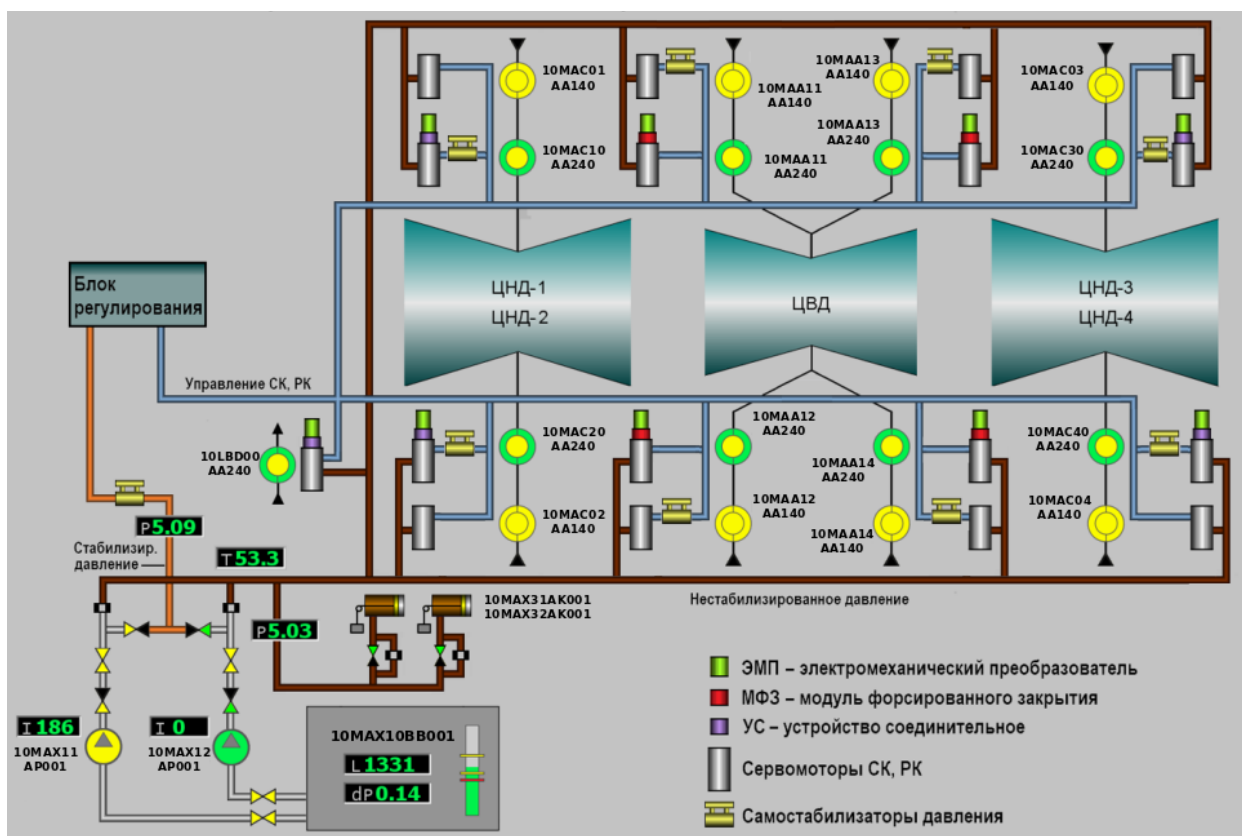


Рисунок 5. Схема расположения ССД  
 Figure 5. Layout of the pressure self-stabilisers

Исключение существующих элементов, участвующих в регулировании, таких как ЭПП-С, ограничитель давления, гидравлические линии управления ЭПП-С и стабилизированного давления, монтаж нового оборудования: ЭМП и ССД, приводят к повышению надежности, экономичности, быстродействию и точности САРЗ, упрощению конструкции и сокращению габаритов трубопроводов, улучшению технических и эксплуатационных характеристик системы регулирования. В связи с заменой ЭПП-С, исключены золотниковая пара и гидравлическая обратная связь, работа которой в со-

вокупности с работой ограничителя давления из-за внешних изменений параметров системы (в частности, изменение температуры и свойств огнестойкой жидкости, износ оборудования, величина токов управления), подвержена потере устойчивости. Существенное сокращение гидравлической составляющей процесса регулирования приводит к снижению вероятности возникновения автоколебаний в системе. Применение ШСП позволяет реализовать двухканальную систему управления регулирующими клапанами, обеспечивает создание и хранение оперативного архива. Точность поддержания

положения РК в соответствии с заводской характеристикой увеличилась за счет меньшего цикла обработки в ШСП (10мс), «ближе» к управляемому РК, так как ранее данная функция была реализована в составе ПТК ЭЧСР.

### Заключение

Модернизация гидравлической и электронной частей САРЗ турбины энергоблока №1 Нововоронежской АЭС-2 была выполнена во время планового ремонта в 2025 году. Была выполнена установка электромеханических преобразователей для управления регулирующими клапанами, а также монтаж самостабилизаторов давления на маслопроводах и модернизация регулирующих клапанов высокого давления. Переход от электрогидравлических преобразователей ЭПП-С к электромагнитным преобразователям (ЭМП) с установкой самостабилизаторов давления на маслопроводах в турбине К-1200-6.8/50 существенно повы-

шает экономичность, надежность и точность системы регулирования, снижает за счет исключения механических и гидравлических элементов и замены их на электронные компоненты функция управления РК стала более стабильной, не зависящей от характеристик огнестойкой жидкости и износа элементов. Повысилась функциональность системы в части ее настройки и диагностики. Благодаря современным техническим решениям удалось повысить надежность противоразгонной защиты турбины и минимизировать вибрационное воздействие на оборудование. Существенно возросло быстродействие, улучшилась точность регулирования частоты вращения турбины. Модернизированная система автоматического регулирования и защиты турбины К-1200-6.8/50 устойчиво выдерживает заданную электрическую нагрузку, обеспечивая возможность ее плавного изменения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/ REFERENCES

1. Поваров В.П., Безручко О.Л., Гусев И.Н., Усачев Д.Е. Паротурбинная установка К-1200-6,8/50. Воронеж: Диамат, 2021. 499 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=mvvlib> (дата обращения: 06.10.2025).  
Povarov V.P., Bezruchko O.L., Gusev I.N., Usachev D.E. Steam turbine unit K-1200-6.8/50. Voronezh: Diamat, 2021. 499 p. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=mvvlib> (accessed: 06.10.2025).
2. Фрагин М.С., Онацко А.Ф., Волчегорский М.Л., Комаров Д.В., Усанов М.А. Механогидравлический преобразователь. Патент № 2154201. Российская федерация, МПК F15B 15/02. Заявка № 98115486 А от 14.08.98; опубл. 10.06.2000. Режим доступа: [https://viewer.rusneb.ru/ru/000224\\_000128\\_0098115486\\_20000610\\_A\\_RU?page=1&rotate=0&theme=white](https://viewer.rusneb.ru/ru/000224_000128_0098115486_20000610_A_RU?page=1&rotate=0&theme=white) (дата обращения: 06.10.2025).  
Fragin M.S., Onatsko A.F., Volchegorsky M.L., Komarov D.V., Usanov M.A. Mechanical-hydraulic converter. patent No. 2154201, Russian Federation, IPC F15B 15/02. Application No. 98115486 A, filed on August 14, 1998; published on June 10, 2000. (In Russ.). Available at [https://viewer.rusneb.ru/ru/000224\\_000128\\_0098115486\\_20000610\\_A\\_RU?page=1&rotate=0&theme=white](https://viewer.rusneb.ru/ru/000224_000128_0098115486_20000610_A_RU?page=1&rotate=0&theme=white) (accessed: 06.10.2025).
3. Фрагин М.С. Регулирование и маслоснабжение паровых турбин: настоящее и ближайшая перспектива. Санкт-Петербург: Энерготех, 2005. 247 с. Режим доступа: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_002711884/?ysclid=mjhbh1m3to199452985](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_002711884/?ysclid=mjhbh1m3to199452985) (дата обращения: 07.10.2025).  
Fragin M.S. Regulation and oil supply of steam turbines: present and near future. St. Petersburg: Energotekh, 2005. 247 p. (In Russ.). Available at [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_002711884/?ysclid=mjhbh1m3to199452985](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_002711884/?ysclid=mjhbh1m3to199452985) (accessed: 07.10.2025).
4. Филатов В.В., Беляков А.А., Сорокин А.А., Бодров А.И., Варзанов А.В., Волков И.С. Опыт наладки системы автоматического регулирования турбины К-1200-6,8/50. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(1):33-39. EDN: [MNYPGH](https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-04). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-04>  
Filatov V.V., Belyakov A.A., Sorokin A.A., Bodrov A.I., Varzanov A.V., Volkov I.S. Setup experience in commissioning hydraulic control system of turbine K-1200-6,8/50. *Nuclear Safety*. 2025;15(1):33-39. (In Russ.). EDN: [MNYPGH](https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-04). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-04>
5. Харкевич А.А. Избранные труды в трех томах. Линейные и нелинейные системы. Москва: Наука, 1973. 566 с. Режим доступа [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_006831598/?ysclid=mjbi2230jx910805967](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_006831598/?ysclid=mjbi2230jx910805967) (дата обращения: 08.10.2025).  
Kharkevich A.A. Selected works in three volumes. Linear and nonlinear systems. Moscow: Nauka, 1973. 566 p. (In Russ.). Available at: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_006831598/?ysclid=mjbi2230jx910805967](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_006831598/?ysclid=mjbi2230jx910805967) (accessed: 08.10.2025).

**ВКЛАД АВТОРОВ:**

**Поваров В.П.** – концепция технического решения, общее руководство;  
**Усачев Д.Е.** – опробование решения;  
**Самодеевко А.А.** – организация работы с автоматикой.

**ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:**

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования.

**КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:**

Конфликт интересов отсутствует.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:**

**Владимир Петрович Поваров**, доктор технических наук, директор Филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (Нововоронежская АЭС), г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-9092-9160>

e-mail: [nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru)

**Дмитрий Евгеньевич Усачев**, начальник ТЦ-6 Филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (Нововоронежская АЭС), г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

e-mail: [UsachevDE@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:UsachevDE@nvnpp1.rosenergoatom.ru)

**Александр Александрович Самодеевко**, начальник ЦТАИ Филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (Нововоронежская АЭС), г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

e-mail: [SamodeenkoAA@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:SamodeenkoAA@nvnpp1.rosenergoatom.ru)

**AUTHORS' CONTRIBUTION:**

**Povarov V.P.** – the concept of a technical solution, general leadership;

**Usachev D.E.** – testing the solution;

**Samodeenko A.A.** – work with automation.

**FUNDING:**

There are no sources of external funding.

**CONFLICT OF INTEREST:**

No conflict of interest.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:**

**Vladimir P. Povarov**, Dr. Sci. (Engin.), Head of Novovoronezh nuclear plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC (Novovoronezh NPP), Novovoronezh, Voronezh Region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-9092-9160>

e-mail: [nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru)

**Dmitry E. Usachev**, Turbine supervisor Head of Novovoronezh nuclear plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC (Novovoronezh NPP), Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.

e-mail: [UsachevDE@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:UsachevDE@nvnpp1.rosenergoatom.ru)

**Alexander A. Samodeenko**, Instrumentation and Controls (I&C) Supervisor of Novovoronezh nuclear plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC (Novovoronezh NPP), Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.

e-mail: [SamodeenkoAA@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:SamodeenkoAA@nvnpp1.rosenergoatom.ru)

Поступила в редакцию / Received 27.10.2025

После доработки / Revision 30.02.2026

Принята к публикации / Accepted 03.03.2026

**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

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-09>

УДК 140.8:621.039.58

EDN EBLZNG

Оригинальная статья / Original paper



**Влияние особенностей национального менталитета на культуру  
безопасности атомной отрасли Республики Беларусь**

**В.П. Давлетбаев ✉, А.В. Кузьмин, С.В. Шило, О.А. Макарова, Д.И. Плюто**

*Государственное научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований –  
Сосны» Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь*

✉ [davletbaev@sosny.bas-net.by](mailto:davletbaev@sosny.bas-net.by)

**Аннотация.** Одной из главных целей атомной отрасли является достижение и поддержание высокого уровня безопасности. Формирование и развитие культуры безопасности – ключевой фактор успешной работы отрасли. Беларусь сталкивается с задачей формирования собственной модели культуры безопасности. Международный опыт доказывает, что человеческий фактор оказывает значительное влияние на безопасную эксплуатацию объектов использования атомной энергии. Не вызывает сомнения и то, что особенности национального менталитета влияют на стиль взаимодействия людей, способы принятия решений и особенности коммуникации, в том числе в области обеспечения безопасности. В этом контексте, изучение типичных черт белорусского национального характера и их влияния на организационное поведение работников атомной отрасли является важной задачей для поддержания безопасности на достижимо высоком уровне. В данной статье авторами рассмотрен вопрос влияния особенностей национального менталитета на культуру безопасности атомной отрасли Республики Беларусь. Исследование проводится на основе методологии CSSCF (Country Specific Safety Culture Forum), позволяющей оценить влияние национальных особенностей на культуру безопасности. В настоящей статье, рассмотрены структура и основные этапы методологии CSSCF. Проведен анализ опыта влияния культурных ценностей на организационное поведение в таких странах, как Швеция, Финляндия, Канада и Япония. Приведены требования действующей нормативно-правовой базы Республики Беларусь в отношении формирования культуры безопасности у работников, осуществляющих деятельность в области использования атомной энергии, а также международные нормы и рекомендации МАГАТЭ по поддержанию и повышению уровня культуры безопасности. Представлены результаты состоявшегося пилотного форума, посвященного исследованию белорусских национальных особенностей, в контексте влияния на обеспечение безопасности в атомной отрасли. Рассмотрено как черты национального характера белорусов соотносятся с выделенными образцами организационного поведения.

**Ключевые слова:** культура безопасности, безопасность, национальный менталитет

**Для цитирования:** Давлетбаев В.П., Кузьмин А.В., Шило С.В., Макарова О.А., Плюто Д.И. Влияние особенностей национального менталитета на культуру безопасности атомной отрасли Республики Беларусь. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(1):78–89. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-09>

**For citation:** Dauletbayeu V.P., Kuzmin A.V., Shyla S.V., Makarava V.A., Pliuta D.I. The influence of national mentalities on the safety culture of the nuclear industry in the Republic of Belarus. *Nuclear Safety*. 2026;16(1):78–89. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-09>

## The influence of national mentalities on the safety culture of the nuclear industry in the Republic of Belarus

Vasili P. Dauletbayev ✉, Andrei V. Kuzmin, Sviatlana V. Shyla,  
Volha A. Makarava, Dzmitry I. Pliuta

*State Scientific Institution «Joint Institute for Energy and Nuclear Research – Sosny» of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

✉ [davletbaev@sosny.bas-net.by](mailto:davletbaev@sosny.bas-net.by)

**Abstract.** One of the main goals of the nuclear industry is to achieve and maintain a high level of safety. The formation and development of a safety culture is a key factor in the successful operation of the industry. Belarus faces the challenge of developing its own model of safety culture. International experience confirms that the human factor has a significant impact on the safe operation of nuclear facilities. It is undoubtedly true that national mentality features influence interpersonal interaction styles, decision-making methods, and communication characteristics, including in the field of safety. In this context, studying the typical features of the Belarusian national character and their impact on the organizational behavior of nuclear industry employees is an important task for maintaining safety at an achievable high level. In this article, the authors explore the influence of national mentality on the safety culture of the nuclear industry in the Republic of Belarus. The research is based on the Country-Specific Safety Culture Forum (CSSCF) methodology, which enables an assessment of how national characteristics influence safety culture. This article reviews the structure and key stages of the CSSCF methodology. Authors also analyze the impact of cultural values on organizational behavior in countries such as Sweden, Finland, Canada and Japan. The article presents the requirements of the current regulatory framework of the Republic of Belarus regarding the formation of a safety culture among employees working in the field of nuclear energy use, as well as international regulations. The results of a pilot forum dedicated to the study of Belarusian national characteristics in the context of their impact on safety in the nuclear industry are presented. The article examines how the national character traits of Belarusians relate to the identified patterns of organizational behavior.

**Keywords:** safety culture, safety, national mentality

### Введение

В современных условиях развития атомной энергетики культура безопасности рассматривается одним из ключевых факторов обеспечения надежности функционирования отрасли. Международный опыт Швеции, Финляндии, Канады, Японии и других стран убедительно демонстрирует, что уровень культуры безопасности зависит не только от нормативно-технической базы и организационной структуры, но и от социально-психологических факторов, включая особенности национального менталитета.

Республика Беларусь – государство, реализующее программу мирного использования ядерных технологий, формирует собственную модель культуры безопасности. В этом контексте особую актуальность приобретает изучение типичных черт белорусского национального характера и их влияния на организационное поведение работников атомной отрасли.

Одним из важнейших уроков, усвоенных в области ядерной безопасности за последние десятилетия, стало понимание того, что человеческий фактор оказывает не меньшее

влияние на надежность эксплуатации объектов использования атомной энергии (далее – ОИАЭ), чем технические аспекты. ОИАЭ представляют собой сложные высокотехнологичные предприятия, а специалисты, которые их проектируют, строят и обслуживают, относятся к числу наиболее квалифицированных инженеров и ученых страны. Однако именно в этой среде бывает непросто донести мысль о том, что такие нематериальные категории, как культура безопасности, организационная эффективность и качество коммуникации, имеют такое же значение, как точность расчетов и соблюдение регламентов эксплуатации.

Необходимость анализа влияния особенностей национального менталитета на культуру безопасности в атомной отрасли Республики Беларусь обусловлена научным интересом и практическими задачами. Анализ позволит не только выявить сильные стороны белорусского характера, которые следует развивать и использовать, но и определить потенциальные ограничения, требующие дальнейшего учета при принятии управленческих решений.

## Национальный контекст и культура безопасности

С самого начала развития атомной энергетики одной из главных целей эксплуатирующих организаций и регулирующих органов было достижение и поддержание высокого уровня безопасности. Постепенно стало ясно: без системной работы над культурой безопасности невозможно обеспечить надежность эксплуатации. Именно поэтому на протяжении десятилетий формирование и развитие культуры безопасности рассматривается ключевым фактором успешной работы отрасли.

Со временем пришло понимание о неразрывной связи особенностей национального менталитета и культуры безопасности. Физические законы одинаковы во всех странах, но стиль взаимодействия людей, способы принятия решений и особенности коммуникации различаются. Первоначально считалось, что эти различия несущественны, однако практика показала обратное: национальный контекст влияет на восприятие ценностей безопасности внутри организаций. Так возникла необходимость учитывать культурные особенности разных стран при разработке подходов к укреплению культуры безопасности.

При этом важно подчеркнуть: ни одна национальная культура не является лучше или хуже другой. У каждой есть черты, которые могут укреплять культуру безопасности, и черты, которые способны ее ослаблять. Следовательно, задача состоит не в изменении национальных особенностей, а в понимании их влияния на организационное поведение и в поиске способов использования их в интересах повышения безопасности.

## Культура безопасности в международной перспективе

Особую значимость культура безопасности имеет для предприятий энергетического сектора, в частности, для таких колоссальных и рискованных предприятий как атомные станции [1]. Становление культуры безопасности является одним из основополагающих принципов работы ОИАЭ, которое

сопровождается развитием международного опыта и анализа аварийных ситуаций.

«Культура безопасности – это такой набор характеристик и особенностей деятельности организаций и поведения отдельных лиц, который устанавливает, что проблемам безопасности атомной станции, как обладающим высшим приоритетом, уделяется внимание, определяемое их значимостью»<sup>20</sup>.

Само же понятие культуры безопасности было впервые озвучено в «Итоговом докладе Международной консультативной группы по ядерной безопасности (далее – МКГЯБ) о совещании по рассмотрению причин и последствий аварии в Чернобыле», опубликованном в Серии изданий по безопасности, № 75-INSAG-1 (1986 г.).

Основные принципы культуры безопасности, ключевые аспекты ее совершенствования нашли отражение в серии докладов МКГЯБ<sup>1,2</sup>, в серии норм по безопасности<sup>3,4,5</sup>, а также в серии докладов по безопасности<sup>6</sup> и пр.

<sup>1</sup> Международная консультативная группа по ядерной безопасности. Культура безопасности. Серия изданий по безопасности № 75 INSAG-4. Вена: МАГАТЭ, 1991. 39 с. Режим доступа [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub882r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub882r_web.pdf) (дата обращения: 01.10.2025).

<sup>2</sup> Ключевые вопросы практики повышения культуры безопасности. Доклад Международной консультативной группы по ядерной безопасности. № INSAG-15. Вена: МАГАТЭ, 2015. 31с. Режим доступа: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1137r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1137r_web.pdf) (дата обращения: 30.08.2025).

<sup>3</sup> The management system for nuclear installations. Safety guide: IAEA safety standards series No GS-G-3.5. IAEA, 2009, 139 p. Available at: <https://gssn.iaea.org/main/SLS/References/GS-G-3.5%20The%20Management%20System%20for%20Nuclear%20Installations%20.pdf> (accessed: 01.10.2025).

<sup>4</sup> Leadership and Management for Safety. General safety requirements No GSR Part 2. IAEA, 2016, 26 p. Available at: [https://gssn.iaea.org/main/REGSUN/REGSUN%20Open%20Lib/SR%20GSR%20Part%202%20Leadership\\_2016.pdf](https://gssn.iaea.org/main/REGSUN/REGSUN%20Open%20Lib/SR%20GSR%20Part%202%20Leadership_2016.pdf) (accessed: 01.10.2025).

<sup>5</sup> Applications of the management system for facilities and activities safety guide: IAEA safety standards series No GS-G-3.1. IAEA, 2006, 123 p. Available at: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1253\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1253_web.pdf) (accessed: 01.10.2025).

<sup>6</sup> Performing safety culture self-assessments. Safety reports series № 83. IAEA, 2016, 157 p. Available at: <https://gssn.iaea.org/main/SLS/References/SRS%20No.%202083%20Performing%20Safety%20Culture%20Self-assessments.pdf> (accessed: 01.10.2025).

Аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-дайити» показали, что национальный культурный контекст оказывает прямое влияние на поведение персонала и эффективность мер безопасности.

### Культура безопасности в национальной правовой базе

Правовое регулирование деятельности в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности в Республике Беларусь осуществляется на основе международных практик и с учетом рекомендаций МАГАТЭ [2]. В Республике Беларусь законодательно закреплено понятие «культура безопасности», которое имеет несколько определений.

Постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 31.03.2010 № 39 «Об утверждении Санитарных норм, правил и гигиенических нормативов «Гигиенические требования к проектированию и эксплуатации атомных электростанций» культура безопасности определена как «комплекс характеристик и особенностей деятельности организаций и поведения отдельных лиц, который устанавливает, что проблемам защиты и безопасности, как обладающим высшим приоритетом, уделяется внимание, соответствующее их значимости»<sup>7</sup>.

Постановлением Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 19.10.2020 № 42 «Об утверждении норм и правил по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Безопасность при обращении с источниками ионизирующего излучения. Общие положения» культура безопасности определена как «совокупность характеристик и особенностей деятельности организаций и поведения всех лиц, вовлеченных в выполнение работ (оказание услуг), влияющих на безопасность источников ионизирующего излучения, которая определяет, что проблемам безопасности ис-

точников ионизирующего излучения, как обладающим высшим приоритетом, уделяется внимание, соответствующее их значимости»<sup>8</sup>.

Постановлением Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 30.03.2022 № 36 «Об утверждении норм и правил по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Правила ядерной безопасности исследовательских ядерных установок»» приведено такое определение: «Культура безопасности – набор характеристик и особенностей деятельности организаций и поведения отдельных лиц, который устанавливает, что вопросам обеспечения безопасности исследовательской ядерной установки, как обладающим высшим приоритетом, уделяется внимание, определяемое их значимостью»<sup>8</sup>.

Приверженность культуре безопасности на всех уровнях управления является одним из основных принципов регулирования безопасности при использовании атомной энергии<sup>9</sup>.

Формирование, поддержание, постоянное укрепление и повышение культуры безопасности является обязанностью эксплуатирующей организации при реализации организационных мероприятий по обеспечению безопасности источников ионизирующего излучения (далее – ИИИ), ядерных установок и пунктов хранения ядерных материалов<sup>8,9,10</sup>.

У работников пользователей ИИИ должна формироваться и поддерживаться культура безопасности<sup>8</sup>.

<sup>7</sup> Постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь 31.03.2010 № 39 «Об утверждении Санитарных норм, правил и гигиенических нормативов «Гигиенические требования к проектированию и эксплуатации атомных электростанций»». Режим доступа: [https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/c0c/minzdrav\\_39.pdf](https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/c0c/minzdrav_39.pdf). (дата обращения: 01.10.2025).

<sup>8</sup> Постановление Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь 19.10.2020 № 42 «Об утверждении норм и правил по обеспечению ядерной и радиационной безопасности». Режим доступа: [https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/cc3/pmchs\\_42\\_v\\_novoy\\_redaktsii.pdf](https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/cc3/pmchs_42_v_novoy_redaktsii.pdf) (дата обращения: 01.10.2025).

<sup>9</sup> Постановление Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь 30.03.2022 № 36 «Об утверждении норм и правил по обеспечению ядерной и радиационной безопасности». Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22238230p> (дата обращения: 01.10.2025).

<sup>10</sup> Закон Республики Беларусь 10.10.2022 № 208-3 «О регулировании безопасности при использовании атомной энергии». Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=H12200208> (дата обращения: 01.10.2025).

Культура безопасности формируется и поддерживается посредством:

- подбора и обеспечения необходимого уровня квалификации работников, занятых в сферах деятельности, влияющих на безопасность ИИИ;

- соблюдения дисциплины при обязательном распределении полномочий и персональной ответственности руководителей и исполнителей;

- разработки и (или) соблюдения применяемых методик и технологий, других локальных правовых актов по вопросам обеспечения радиационной безопасности, их периодического обновления с учетом накапливаемого опыта;

- понимания каждым работником влияния его деятельности на безопасность ИИИ и последствий, к которым может привести несоблюдение или некачественное выполнение требований должностных инструкций, технологических инструкций и регламентов, других локальных правовых актов по вопросам обеспечения радиационной безопасности;

- понимания каждым работником недопустимости сокрытия ошибок в своей деятельности, необходимости выявления и устранения причин их возникновения, необходимости постоянного самосовершенствования, изучения и внедрения передового опыта, в том числе зарубежного<sup>8</sup>.

Поддержание и повышение уровня культуры безопасности является неотъемлемым компонентом интегрированной системы управления эксплуатирующей организации.

Согласно нормам и правилам по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Общие требования к интегрированным системам управления эксплуатирующих организаций в целях обеспечения ядерной и радиационной безопасности», утвержденным постановлением Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 18.10.2021 № 73, система управления эксплуатирующей организации должна способствовать поддержанию и повышению уровня культуры безопасности, в том числе путем:

- применения единых понятий и подходов для решения ключевых вопросов, свя-

занных с поддержанием и повышением культуры безопасности;

- обеспечения ответственных работников или групп работников необходимыми средствами для успешного выполнения такими работниками (группами работников) поставленных задач с соблюдением требований по безопасности;

- реализации подхода по непрерывному обучению (в том числе самообучению) на всех уровнях функционирования эксплуатирующей организации;

- обеспечения ресурсами и средствами, необходимыми для постоянного повышения уровня культуры безопасности;

- применения комплексного подхода при внедрении в деятельность требований к обеспечению физической защиты и требований по безопасности, направленного на исключение снижения уровня культуры безопасности<sup>11</sup>.

В эксплуатирующей организации должна формироваться и поддерживаться культура безопасности путем подбора, обучения и подготовки работников (персонала) в каждой сфере деятельности, влияющей на безопасность, установления и строгого соблюдения дисциплины при четком распределении персональной ответственности руководителей и исполнителей, разработки и строгого соблюдения требований инструкций по выполнению работ и их периодической корректировки с учетом накапливаемого опыта.

### Уроки международных аварий

История крупных аварий на АЭС ясно показала, насколько важна культура безопасности. Чернобыльская катастрофа впервые заставила всерьез задуматься об этой стороне вопроса, а авария на «Фукусиме-дайити» еще раз подчеркнула роль челове-

<sup>11</sup> Постановление Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь № 73 от 18.10.2021 «Об утверждении норм и правил по обеспечению ядерной и радиационной безопасности “Общие требования к интегрированным системам управления эксплуатирующих организаций в целях обеспечения ядерной и радиационной безопасности”». Режим доступа: [https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/407/pmchs\\_ot\\_18102021\\_73.pdf](https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/407/pmchs_ot_18102021_73.pdf) (дата обращения: 01.10.2025).

ческих и организационных факторов. Тогда стало очевидно, что культура безопасности должна формироваться не только на уровне операторов, но и в регулирующих органах, а также в эффективности их взаимодействия.

Особое внимание к национальным особенностям привлекли слова председателя независимой комиссии по расследованию аварии на АЭС «Фукусима» Национального парламента Японии К. Курокавы: «...Необходимо признать – и это очень болезненно – что это была катастрофа «Made in Japan». Ее фундаментальные причины кроются в укоренившихся традициях японской культуры: нашем рефлексорном подчинении; нашем нежелании подвергать сомнению авторитеты; нашей преданности «исполнять инструкции»; нашему коллективизму; и нашей сдержанности. Последствия халатности на Фукусиме выглядят катастрофическими, но образ мышления, который привел к ней, можно найти по всей Японии...»<sup>12</sup>.

Его слова вызвали бурные дискуссии, но одновременно заставили международное сообщество глубже задуматься о том, как культурные и национальные особенности страны могут влиять на безопасность.

### **Международный опыт: Форум CSSCF**

Международные организации, такие как Агентство по ядерной энергии ОЭСР и Всемирная ассоциация операторов АЭС, разработали методологию CSSCF (Country-Specific Safety Culture Forum), позволяющую оценивать влияние национальных особенностей на культуру безопасности. Цель – предоставить каждой стране возможность проанализировать, каким образом ее культурный контекст влияет на культуру безопасности, и на этой основе выработать устойчивые пути ее укрепления. Задача не в сравнении стран между собой, а в предоставлении возможности каждой стране понять, как ее культурные и национальные

особенности проявляются в организационном поведении специалистов атомной отрасли.

Структура методологии CSSCF состоит из пяти основных этапов:

1. Сбор данных и анализ национальных особенностей.

Проводится экспресс-исследование с интервью и фокус-группами представителей различных заинтересованных сторон: регулирующих органов, эксплуатирующих и научных организаций. Анализируются темы, связанные с национальной культурой и поведением в области обеспечения ядерной безопасности.

2. Применение национальных особенностей в интерактивных играх.

Полученные данные используются для моделирования ситуаций в формате игры по ролям, что позволяет участникам обсуждать реальные сценарии и оценивать влияние национальных особенностей на культуру безопасности.

3. Форум с широким представительством отрасли.

Проводятся обсуждения на пленарных заседаниях и в малых группах, где специалисты могут обменяться мнениями, выявить слабые места и предложить пути их укрепления с учетом национального контекста.

4. Анализ и документирование результатов.

На основании материалов экспресс-исследования и форума выявляются ключевые национальные особенности и их проявления в организационном поведении, формируются рекомендации для повышения культуры безопасности.

5. Подготовка итогового отчета.

В отчете фиксируются изученные вопросы и описание процесса проведенного исследования, цель которых подтолкнуть к самоанализу и определению влияния на ядерную безопасность, а также к разработке корректирующих мер для дальнейшего повышения уровня культуры безопасности.

Такой подход позволяет учитывать культурные и национальные привычки, ценности и поведенческие модели, реально проявляющиеся в организациях атомной отрасли.

<sup>12</sup> The official report of The Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission. Executive summary. The National Diet of Japan. 2012:9. Available at: [https://www.nirs.org/wpcontent/uploads/fukushima/naic\\_report.pdf](https://www.nirs.org/wpcontent/uploads/fukushima/naic_report.pdf) (accessed: 01.10.2025).

Определить национальную культуру как однородное явление невозможно. Внутри одной страны могут существовать региональные, социальные и организационные различия, а также ситуативные особенности поведения. Человек может быть склонен к риску в одной сфере жизни, но проявлять крайнюю осторожность в профессиональной деятельности. Культура многослойна и многогранна, что делает ее изучение сложным, но вместе с тем необходимым процессом.

В таблице 1 представлены национальные особенности, влияющие на культуру безопасности таких стран, как Швеция, Финляндия, Канада и Япония<sup>13,14,15,16</sup>.

### Менталитет белорусов и его влияние на культуру безопасности

11–12 сентября 2025 г. в Республике Беларусь в Минске на базе Республиканского центра безопасности жизнедеятельности Министерства по чрезвычайным ситуациям состоялся пилотный форум, посвященный исследованию белорусских национальных особенностей, влияющих на безопасность и учитываемых при формировании моделей культуры безопасности в организациях, задействованных в программе мирного использования ядерных технологий.

**Таблица 1.** Примеры влияния национальных особенностей на культуру безопасности (составлено авторами на основе открытых источников, см. постраничные сноски 13–16)

**Table 1.** Examples of the influence of national characteristics on the safety culture (compiled by the authors on the basis of open sources, see footnotes 13–16)

Швеция	Финляндия	Канада	Япония
«Samskap» (коллективизм, работа в группе, сотрудничество, гармония в коллективе)	Доверие и открытость	Приверженность обществу договору (акцент на вежливости, тактичности и тактичности в общении, потребности многих перевешивают потребности одного)	Давление со стороны сверстников (подчинение мнению большинства, «не высказывайся», «страх неудач»)
«Allskap» (равноправие, справедливость, участие в принятии решений)	Техническая строгость (акцент на прагматизме, фактах и науке)	Инклюзивность (толерантность) и коллективный подход	«Majime» (усердие) (усердный, честный труд для достижения поставленных руководством целей)
Безопасность и доверие	Подход, ориентированный на решение (акцент на эффективность и проактивное планирование)	Ориентированность на результат	«Hoshu-teki» (консерватизм)
Свобода	Персональная ответственность (желание независимости в принятии компетентных решений, гордость за проделанную работу)	Коллективная гордость и личное смирение	«Wa» (гармония) (согласие в коллективе)

<sup>13</sup> Country-Specific Safety Culture Forum: Sweden. Nuclear energy agency organisation for economic co-operation and development. 2018;7420:28–33. Available at: <https://oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/7420-cssc-sweden.pdf> (accessed: 01.10.2025).

<sup>14</sup> Country-Specific Safety Culture Forum: Finland. Nuclear energy agency organisation for economic co-operation and development. 2019;7488:36–41 Available at: <https://oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/7488-csscf-finland.pdf> (accessed: 01.10.2025).

<sup>15</sup> Country-Specific Safety Culture Forum: Canada. Nuclear energy agency organisation for economic co-operation and development. 2023;7666:38–42. Available at: [https://oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2024-02/7666\\_csscf\\_canada.pdf](https://oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2024-02/7666_csscf_canada.pdf) (accessed: 01.10.2025).

<sup>16</sup> Country-Specific Safety Culture Forum: Japan. Nuclear energy agency organisation for economic co-operation and development. 2024; 7680:41–45. Available at: [https://oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2024-08/7680\\_csscf\\_japan\\_rev2.pdf](https://oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2024-08/7680_csscf_japan_rev2.pdf) (accessed: 01.10.2025).

Продолжение таблицы 1  
 Table 1 continuation

Швеция	Финляндия	Канада	Япония
Удовлетворенность/ самоуспокоенность/ национальная гордость	Равноправие (солидарность и низкий акцент на иерархии)	Доверие и уважение персональных границ	«Не говори громко»
Стремление к общему пониманию	Уважение и соблюдение логических правил (потребность в ясности и порядке)	Избегание конфликтов	Коллективизм
	Финский стиль общения (молчаливый, прямой, прозрачный, тихий, честный)		Двусмысленность (неопределенность в общении и принятии решений)
			Страх неудач
			Тактичность
			«Nenko-joretsu» (уважение старших) «Okami-ishiki» (строгое подчинение начальству)

Форум был организован Базовой организацией государств-участников СНГ по вопросам создания ядерной инфраструктуры под эгидой Комиссии государств-участников СНГ по использованию атомной энергии в мирных целях. Значительную поддержку оказали Департамент по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь и Обнинский научно-исследовательский центр «Прогноз». Ключевая цель мероприятия заключалась в определении значимости влияния национального белорусского контекста на обеспечение безопасности при выполнении работ в организациях атомной отрасли Республики Беларусь. Иными словами, обсуждалось, как именно менталитет, культурные установки и социальные особенности белорусов могут усиливать или, напротив, ограничивать развитие культуры безопасности.

В работе форума приняли участие около 70 специалистов из более чем 15 организаций: органов управления и регулирования использования атомной энергии, научно-технических центров, организаций энергетической системы, а также учреждений высшего образования. Такая междисциплинарность обеспечила широкий взгляд на проблему и позволила объединить усилия управленцев, ученых, инженеров и преподавателей.

Особое внимание было уделено развитию практических навыков. В ходе дискуссий

и рабочих сессий рассматривались:

- основные факторы безопасной производственной деятельности организаций атомной отрасли;
- формирование особенностей национального характера, влияющих на безопасность и надежность;
- влияние национальных черт на организационное поведение, определяющее готовность сотрудников соблюдать нормы и активно участвовать в поддержании безопасности.

Результатами форума стало не только углубление знаний, но и совершенствование практических навыков и обмен опытом в области развития культуры безопасности и лидерства. Все это рассматривается как ключевые составляющие надежного функционирования атомной энергетики в Беларуси<sup>17</sup>.

По итогам обсуждений, в рамках первой задачи, были выделены основные образцы организационного поведения, которые влияют на безопасность и надежность деятельности атомной отрасли Республики Беларусь:

- **лидерство** проявляется в умении мотивировать подчиненных на достижение результата, формировать атмосферу доверия

<sup>17</sup> Департамент по ядерной и радиационной безопасности министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь – текст : электронный. Режим доступа: <https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/novosti/498699> (дата обращения: 01.10.2025).

и командного взаимодействия. Оно выражается через личный пример, готовность делиться опытом, наставничество и сохранение кадрового потенциала;

– **применение проактивного подхода** означает инициативность, критическое мышление, умение выявлять потенциальные проблемы до того, как они перерастут в угрозы. Белорусским специалистам свойственны взаимная перепроверка процессов, анализ внештатных ситуаций, стремление использовать лучшие практики и внедрять инновации;

– **самообучение и саморазвитие** – важная часть профессиональной культуры. Это стремление повышать квалификацию, перенимать опыт старших коллег, развивать систему наставничества и обеспечивать преемственность знаний;

– **системное управление** подразумевает создание условий труда, рациональное распределение ресурсов, применение кодекса поведения работников и стратегическое мышление. В основе – циклический подход PDCA (планирование–выполнение–проверка–корректировка), обеспечивающий устойчивое развитие;

– **ответственность** проявляется в качественном выполнении задач в установленные сроки, готовности брать на себя обязательства, следовать процедурам и распределять зоны ответственности. Характерна не боязнь принятия решений в сложных условиях;

– **коммуникация** включает открытость диалога, честность, наличие обратной связи, движение идей по вертикали и горизонтали. Важно, что белорусская практика ориентируется на доверие и взаимное уважение при обмене информацией;

– **командная работа** основывается на коллегиальности решений, взаимопомощи и сотрудничестве. Для белорусского коллектива важны прозрачные правила, согласованность действий и самоотдача ради общей цели.

Вторая задача форума заключалась в формировании перечня особенностей белорусского национального характера, которые влияют на безопасность и надежность производственной деятельности:

– **трудолюбие** признано базовой ценностью, обеспечивающей исполнительность, дисциплину и готовность работать ради результата;

– **памяркоўнасць (рассудительность)** выражается в осторожности, эмоциональной сдержанности и стремлении взвешенно принимать решения;

– **коллективизм** формирует ориентацию на мнение большинства и взаимовыручку, позволяя обеспечивать поддержку в трудных ситуациях;

– **толерантность** проявляется в терпимости к чужому мнению и уважении к критике;

– **хозяйственность** отражается в умении рационально использовать ресурсы, бережное отношение к оборудованию и стремление к экономической целесообразности;

– **дисциплинированность** обеспечивает четкое выполнение инструкций и правил на основе внутреннего убеждения;

– **познавательная мотивация** выражается в стремлении к образованию, повышению квалификации и самосовершенствованию;

– **скромность** иногда препятствует инициативности и карьерному росту, так как формирует осторожность в выражении мнений и зависимость от руководителя;

– **честность** укрепляет доверие в коллективе, способствует оперативному устранению ошибок и повышает надежность;

– **ожидание «плохого», тревожность** связаны с высокой перестраховкой и анализом рисков, но одновременно повышают адаптивность в условиях неопределенности;

– **скрупулезность и педантизм** обеспечивают внимание к деталям, качественное выполнение работы и своевременное выявление даже мелких проблем.

Третья задача форума заключалась в том, чтобы определить, какие черты национального характера способствуют развитию культуры безопасности, а какие – могут ее ограничивать. Так, трудолюбие и дисциплинированность усиливают ответственность и командную работу. Рассудительность помогает формировать системное управление, но иногда задерживает процесс принятия решений. Коллективизм укрепляет атмосферу взаимопомощи, но одновременно может снижать личную инициативность. Скром-

ность и тревожность уменьшают готовность брать на себя лидерские функции, но при этом усиливают внимание к процедурам и повышают осторожность в работе.

Таким образом, форум показал, что особенности белорусского менталитета обладают двойственным влиянием: одни качества укрепляют безопасность, другие требуют учета и компенсации через управленческие и образовательные механизмы. На завершающем этапе форума мы, как эксперты, рассмотрели, как черты национального характера белорусов соотносятся с выделенными образцами организационного поведения.

Анализ показал, что трудолюбие и дисциплинированность напрямую поддерживают такие модели, как ответственность и командная работа. Они формируют основу надежности: работники склонны выполнять задачи в срок, следовать процедурам и нести личные обязательства за результат.

«Памяркоўнасць» (рассудительность) проявляется особенно ярко в сфере системного управления: она помогает выстраивать взвешенные решения, обеспечивать безопасность процессов и избегать импульсивных шагов. Однако одновременно эта черта может замедлять принятие решений, что требует балансировки через лидерство и проактивный подход.

Коллективизм тесно связан с коммуникацией и командной работой: в белорусских коллективах значимы взаимопомощь, согласованность действий, готовность поддерживать коллегу. Вместе с тем, чрезмерная зависимость от мнения большинства иногда препятствует развитию инициативности.

Толерантность усиливает открытость коммуникаций, способствует доверию и снижению конфликтности. В то же время ее чрезмерность может приводить к избеганию острых тем и недостаточной критичности.

Хозяйственность отражается в системном управлении: умение бережно и рационально использовать ресурсы делает работу более надежной и экономически устойчивой.

Познавательная мотивация напрямую влияет на самообучение и саморазвитие, поддерживает стремление к повышению квалификации, внедрению лучших практик и инноваций.

Честность тесно связана с коммуникацией и ответственностью: она создает прозрачность взаимодействий и позволяет оперативно исправлять ошибки без страха наказания.

Скромность и ожидание «плохого» – более противоречивые качества. С одной стороны, они снижают стремление к лидерству и инициативности, а с другой – усиливают аккуратность, внимание к деталям и предосторожность, что ценно в атомной отрасли.

Скрупулезность и педантизм напрямую поддерживают системное управление, ответственность и качество выполнения задач. Они помогают фиксировать даже незначительные проблемы и обеспечивать документированность процессов.

Матрица взаимосвязи показала, что большинство национальных черт белорусов положительно влияет на культуру безопасности, однако некоторые из них требуют управленческой коррекции. В частности, развитие лидерства и проактивности остается задачей, так как традиционная скромность и осторожность работников ограничивают проявление этих моделей поведения.

Таким образом, формируется обобщенный портрет белоруса – человека трудолюбивого, дисциплинированного, отзывчивого и готового к взаимопомощи. Эти качества создают благоприятные условия для укрепления культуры безопасности, так как способствуют доверию, ответственности и командной работе. В то же время осторожность и склонность к тревожности могут влиять на поведение в условиях неопределенности и рисков, что также требует учета.

## Заключение

Развитие культуры безопасности в атомной отрасли сегодня невозможно без учета национального контекста. Национальные особенности не являются ни положительными, ни отрицательными сами по себе. Их влияние на культуру безопасности зависит от того, насколько эксплуатирующие организации и органы государственного регулирования умеют использовать сильные стороны менталитета и корректно компенсировать возможные ограничения.

Опыт эксплуатации ОИАЭ за последние десятилетия убедительно показывает: ключ к высокому уровню безопасности заключается не только в технической надежности оборудования и высоком профессионализме персонала, но и в развитой культуре безопасности. Человеческий фактор играет столь же важную роль, как и любые инженерные решения или технические процедуры.

Задача – не оценивать культуру по шкале «хорошо – плохо», а выявлять ее сильные и слабые стороны, использовать понимание этих особенностей для устойчивого повышения безопасности. Для Республики Беларусь это означает необходимость формиро-

вать условия, в которых трудолюбие, дисциплина, коллективизм и честность становятся не только личными качествами работников, но и системными элементами культуры безопасности. Осознанная интеграция этих черт в организационную практику позволяет повысить устойчивость, готовность к рискам и эффективность взаимодействия на ОИАЭ.

Таким образом, изучение национального менталитета белорусов и его влияния на культуру безопасности показывает, что человеческий фактор и ценности общества являются важными элементами безопасности, наряду с техническими и организационными мерами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Руденко В.А., Ожерельев В.Д., Евдошкина Ю.А., Цуверкалова О.Ф., Сетраков А.Н. Системный подход к оценке корректирующих мероприятий для формирования культуры безопасности в атомной отрасли. *Глобальная ядерная безопасность*. 2020;(3):85-94. <https://doi.org/10.26583/GNS-2020-03-09>
- Rudenko V.A., Ozhereliev V.D., Evdoshkina Yu.A., Tsuverkalova O.F., Setrakov A.N. A Systematic Approach to Evaluating Corrective Actions to Create Safety Culture in Nuclear Industry. *Nuclear Safety*. 2020;(3):85-94. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/GNS-2020-03-09>
2. Корбут Т.Н., Кузьмин А.В., Науцик О.А., Кузьмук Д.А. Организация обучения по культуре безопасности в Республике Беларусь. *Глобальная ядерная безопасность*. 2022;45(4):79-86. <https://doi.org/10.26583/gns-2022-04-08>
- Korbut T.N., Kuzmin A.V., Nautsyk O.A., Kuzmuk D.A. Safety Culture Education and Training in the Republic of Belarus. *Nuclear Safety*. 2022;45(4):79-86. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2022-04-08>

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Давлетбаев В.П.** – формирование идеи, формулирование выводов, компаративный анализ документов, написание текста статьи;

**Кузьмин А.В.** – формулировка и развитие ключевых целей, задач, концептуализация статьи, формулирование выводов;

**Шило С.В.** – сбор данных, составление черновика рукописи, анализ и интерпретация полученных данных, написание текста статьи;

**Макарова О.А.** – исследование нормативно-правовой базы в области обеспечения безопасности при использовании атомной энергии, критический пересмотр рукописи с внесением ценного замечания интеллектуального содержания;

**Плюто Д.И.** – сбор данных, составление черновика рукописи, анализ и интерпретация международных примеров влияния национальных особенностей.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

#### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Dauletbayeu V.P.** – concept development, formulation of conclusions, comparative analysis of documents, article writing;

**Kuzmin A.V.** – formulation and development of key goals and objectives, conceptualization of the article, formulation of conclusions;

**Shyla S.V.** – data collection, drafting of the manuscript, analysis and interpretation of the data obtained, article writing;

**Makarava V.A.** – research of the regulatory framework in the field of nuclear safety, critical revision of the manuscript with valuable comments of intellectual content provision;

**Pliuta D.I.** – data collection, drafting of the manuscript, analysis and interpretation of international examples of the national distinctive features' influence.

#### FUNDING:

The study had no external funding.

#### CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interests.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Василий Петрович Давлетбаев**, заместитель генерального директора - главный инженер, государственное научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь.

e-mail: davletbaev@sosny.bas-net.by

**Андрей Владимирович Кузьмин**, кандидат физико-математических наук, доцент, генеральный директор, государственное научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь.

e-mail: avkuzmin@sosny.bas-net.by

**Светлана Викторовна Шило**, начальник отдела безопасности, государственное научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь.

e-mail: sveta-shylo@sosny.bas-net.by

**Ольга Александровна Макарова**, начальник отдела организационной, правовой и кадровой работы, государственное научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь.

e-mail: law.dep@sosny.bas-net.by

**Дмитрий Иванович Плюто**, заместитель главного инженера, государственное научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь.

e-mail: dip@sosny.bas-net.by

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Vasili P. Dauletbayeu**, Deputy General Director – Chief Engineer, The State Scientific Institution «The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny» of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus.

e-mail: davletbaev@sosny.bas-net.by

**Andrei V. Kuzmin**, Cand. Sci (Phys.& Math.), Associate Professor, Director General, The State Scientific Institution «The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny» of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus.

e-mail: avkuzmin@sosny.bas-net.by

**Sviatlana V. Shylo**, Head of Security Department, The State Scientific Institution «The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny» of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus.

e-mail: sveta-shylo@sosny.bas-net.by

**Volha A. Makarava**, Head of the Department of Organizational, Legal and Personnel Management Work, The State Scientific Institution «The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny» of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus.

e-mail: law.dep@sosny.bas-net.by

**Dzmitry I. Pliuta**, Deputy Chief Engineer, The State Scientific Institution «The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny» of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus.

e-mail: dip@sosny.bas-net.by

Поступила в редакцию / Received 14.11.2025

После доработки / Revision 11.02.2026

Принята к публикации / Accepted 17.02.2026

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

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-10>

УДК [331.45+338.45]:65.012

EDN LVOZHС

Оригинальная статья / Original paper



Динамика снижения производственного травматизма и экономическая  
эффективность мер промышленной безопасности в Республике  
Казахстан на примере АО «Ульбинский металлургический завод»  
АО «НАК «Казатомпром»

Т.Ш. Идрисов<sup>1,2</sup> ✉, М.В. Коптелов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>АО «Ульбинский металлургический завод» АО «НАК «Казатомпром», г. Усть-Каменогорск,  
Республика Казахстан

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup>Частное учреждение по информационно-аналитическому обеспечению «Ситуационно-  
кризисный Центр Росатома», г. Москва, Российская Федерация

✉ idrisovts@ulba.kz

**Аннотация.** В работе рассматривается динамика снижения травматизма на производстве и экономическая результативность мер обеспечения промышленной безопасности в АО «Ульбинский металлургический завод» в период 2020–2024 годов. Исследование основано на таких данных внутренней отчетности как число несчастных случаев с потерей трудоспособности, показатель LTIFR, годовые затраты на охрану труда и промышленную безопасность. Применен сопоставительный анализ временных рядов «травматизм–затраты» с учетом специфики бериллиевого передела (термические и механические риски, токсичные аэрозоли бериллия). Зафиксировано снижение LTIFR с 0,18 (2020) и 0,28 (2021) до 0,00 в 2022–2024 гг. при одновременном росте инвестиций в безопасность в фазе 2022–2023 гг. и последующей оптимизации расходов в 2024 году. Интерпретация результатов указывает на системный характер достигнутого эффекта: сочетание инженерных барьеров (аспирация, локальные укрытия, блокировки, модернизация ГПМ), управляемости работ повышенной опасности (горячие, газоопасные, стропальные, LOTO) и укрепления дисциплины поведения. Сделан вывод о соответствии траектории «нулевого LTIFR» модели ALARP, а также о положительной экономической отдаче от целевых вложений в безопасность. Показано, что устойчивое достижение нулевого значения LTIFR в течение трех лет связано с комплексом инженерных, организационных и поведенческих мер и соответствует принципу ALARP, обеспечивая положительную экономическую отдачу от вложений в безопасность. Отмечены ограничения в виде агрегированности данных, отсутствия разреза по видам происшествий и leading-показателям (near miss, микротравмы).

**Ключевые слова:** промышленная безопасность, LTIFR, охрана труда, работы повышенной опасности, экономическая эффективность

**Для цитирования:** Идрисов Т.Ш., Коптелов М.В. Динамика снижения производственного травматизма и экономическая эффективность мер промышленной безопасности в Республике Казахстан на примере АО «Ульбинский металлургический завод» АО «НАК «Казатомпром». *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(1):90–98. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-10>

**For citation:** Idrisov T.Sh., Koptelov M.V. The dynamics of the decline in work-related injuries and the economic efficiency of industrial safety measures in the Republic of Kazakhstan using the example of Ulba Metallurgical Plant JSC Kazatomprom JSC. *Nuclear Safety*. 2026;16(1):90–98. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-10>

## The dynamics of the decline in work-related injuries and the economic efficiency of industrial safety measures in the Republic of Kazakhstan using the example of Ulba Metallurgical Plant JSC Kazatomprom JSC

Tair Sh. Idrisov<sup>1,2</sup> ✉, Matvey V. Koptelov<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Ulba Metallurgical Plant JSC, Kazatomprom JSC, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan

<sup>2</sup>National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup>Situational and Crisis Centre of State Corporation Rosatom, Moscow, Russian Federation

✉ idrisovts@ulba.kz

**Abstract.** This paper examines injury dynamics and the economic effectiveness of industrial safety measures in the UMP JSC over 2020–2024. The study relies on internal reporting data: the number of lost-time injuries, the LTIFR indicator, and annual expenditures on occupational and industrial safety. A comparative time-series analysis of «injuries-expenditures» is performed, accounting for the specifics of beryllium processing (thermal and mechanical hazards, toxic beryllium aerosols). LTIFR declined from 0.18 (2020) and 0.28 (2021) to 0.00 in 2022–2024, coinciding with increased safety investments in 2022–2023 and subsequent cost optimization in 2024. The results indicate a systemic effect driven by a combination of engineering barriers (extraction and dust collection, local enclosures, interlocks, modernization of lifting equipment), control of high-risk work (hot, gas-hazardous, rigging, LOTO), and strengthened behavioral discipline. The trajectory of «zero LTIFR» aligns with the ALARP model and suggests positive economic returns on targeted safety investments. Limitations include data aggregation, lack of breakdown by incident type, and the absence of leading indicators (near misses, micro-injuries).

**Keywords:** industrial safety, LTIFR, occupational safety, high-risk work, economic efficiency

### Введение

Безопасность труда в металлургическом производстве не может сводиться к формальному выполнению нормативных требований. В отличие от многих классических производственных процессов, металлургические переделы сопряжены не только с высокотемпературными режимами и рисками грузоподъемных операций, но и с воздействием токсичной пыли и аэрозолей. Даже кратковременное неконтролируемое воздействие таких факторов способно вызвать тяжелые заболевания дыхательной системы и привести к длительной утрате трудоспособности, придавая промышленной безопасности одновременно производственный и медико-гигиенический характер. В таких условиях охрана труда становится основой устойчивости технологического цикла и экономической стабильности предприятия, а не лишь социальной обязанностью работодателя.

В мировой практике управления профессиональными рисками подчеркивается переход от реактивного подхода («расследовать инцидент после того, как он произошел») к проактивному, ориентированному на предотвращение инцидентов и формирование барьеров до события [1]. Этот подход

отражен в современных системах управления охраной труда и производственной безопасностью (в частности, ISO 45001), а также в принципах управления процессной безопасностью (Process Safety Management), где ключевой акцент делается на идентификацию и устранение критических сценариев потери контроля над энергией, веществом или источником опасности [2].

Ульбинский металлургический завод (далее – АО «УМЗ») относится к числу предприятий повышенной опасности, в том числе и по причине наличия бериллиевого передела. Этот тип производства сочетает термические и механические факторы классической металлургии (расплавы, термообработка, транспортировка заготовок и изделий с использованием грузоподъемных механизмов) с химико-токсикологическими факторами (микродисперсные аэрозоли бериллия и его соединений). В таких условиях система управления безопасностью не может ограничиваться выполнением минимально установленных норм. Она вынуждена включать инженерные барьеры (аспирация, локальная вытяжка, экранирование зон плавки и механической обработки, контроль герметичности технологических узлов), управляемость критических операций (до-

пуск к газоопасным и горячим работам, контроль стропальных операций, энергозащита оборудования при обслуживании в логике lockout/tagout) и культуру безопасного поведения персонала [3].

Международные публикации различных авторов последовательно указывают, что устойчивое снижение травматизма в высокоопасных производствах достигается только при одновременном воздействии на три группы факторов: (i) техническое снижение опасных воздействий, (ii) управляемость технологических операций с повышенным риском, (iii) организационно-поведенческая зрелость – готовность персонала выявлять и сообщать о рисках до наступления инцидента [4–6]. Такой подход напрямую связан с экономикой предприятия: каждый тяжелый инцидент в бериллиевом переделе одновременно означает ущерб здоровью работника, простой технологической линии (часто уникальной и непрерывной), потенциальные экологические претензии и финансовые потери.

В этой связи, стратегической целью АО «УМЗ» является не только соответствие обязательным требованиям промышленной безопасности, но и достижение устойчиво нулевого уровня тяжелых производственных травм. На практике, целевой индикатор формулируется через показатель LTIFR – частоту травм с потерей трудоспособности, выраженную в случаях на 1 млн отработанных человеко-часов [7]. Важен не разовый спад, а удержание LTIFR на нулевом уровне в течение нескольких лет подряд, что указывает на реальную управляемость производственного риска, а не на статистическую флуктуацию.

Целью исследования является количественная оценка влияния совокупности технических, организационно-управленческих и поведенческих мер промышленной безопасности на динамику травматизма в бериллиевом производстве АО «УМЗ» в 2020–2024 гг. на основе сопоставления показателей LTIFR и числа несчастных случаев с потерей трудоспособности с объемами целевых затрат на охрану труда и промышленную безопасность.

Для достижения поставленной цели в ра-

боте решались следующие задачи:

- проанализировать динамику LTIFR и числа несчастных случаев с потерей трудоспособности в бериллиевом производстве АО «УМЗ» за 2020–2024 гг.;

- сопоставить выявленную динамику травматизма с изменением объемов затрат на охрану труда и промышленную безопасность;

- оценить устойчивость достигнутого нулевого уровня LTIFR с точки зрения принципа ALARP;

- идентифицировать ключевые группы мер (инженерные, организационные, поведенческие), обеспечившие снижение и удержание риска на достигнутом уровне.

Научная новизна настоящего исследования состоит в:

- эмпирическом обосновании устойчивого нулевого уровня LTIFR в условиях высокоопасного бериллиевого производства при переходе от фазы интенсивных инвестиций в безопасность к фазе их оптимизации;

- конкретизации применения принципа ALARP к металлургическому предприятию с бериллиевым переделом на основе совместного анализа динамики травматизма и структуры затрат на охрану труда и промышленную безопасность;

- интерпретации затрат на промышленную безопасность как формы инвестиционной деятельности предприятия, обеспечивающей не только снижение социального риска, но и повышение производственной устойчивости.

### Материалы и методы исследований

В исследовании использованы данные внутренней отчетности по охране труда и промышленной безопасности бериллиевого производства АО «УМЗ» за 2020–2024 годы. Рассматривались три типа сведений:

- зарегистрированные несчастные случаи с потерей трудоспособности;

- показатель LTIFR (частота травм с потерей трудоспособности, выраженная в случаях на 1 млн отработанных человеко-часов);

- годовые затраты на охрану труда и промышленную безопасность, учитывающие как капитальные, так и эксплуатационные

расходы на мероприятия по снижению риска.

Такая структура данных позволяет анализировать безопасность не только с социальной точки зрения (фактическая травматичность персонала), но и с производственно-экономической: насколько стабильно удается удерживать управляемый уровень риска при заданном уровне финансирования.

Анализ проводился в два этапа. На первом этапе была изучена динамика показателей травматизма по годам. В расчет принимались как абсолютные значения (количество несчастных случаев с потерей трудоспособности в конкретном году), так и нормированный показатель LTIFR. Принципиально важно использовать именно нормированный показатель, поскольку он учитывает фактически отработанные человеко-часы и, тем самым, позволяет корректно сопоставлять разные годы даже при изменении загрузки производства и численности персонала. Это особенно актуально для участков бериллиевого передела, где режим работы и состав бригад могут меняться в зависимости от производственной программы.

На втором этапе сопоставлялась динамика травматизма с финансовыми данными предприятия. В рамках отчетности на охрану труда и промышленную безопасность учитываются расходы на технические меры (системы аспирации и пылеулавливания на операциях с образованием аэрозолей бериллия, локальные укрытия и экранирование опасных зон, модернизация грузоподъемного оборудования, обеспечение контролируемого доступа к горячим и газоопасным работам), а также организационные и поведенческие меры (обучение и инструктаж персонала, повышение дисциплины выполнения работ повышенной опасности, контроль соблюдения процедур стропальных операций и энергоразобщения оборудования перед обслуживанием). Именно поэтому, – затраты на охрану труда в данном случае трактуются как прямые инвестиции в предотвращение инцидентов.

Отдельно рассматривались три характерных периода, которые отчетливо просматриваются по данным предприятия. В 2020–2021 гг. фиксировались случаи травматизма

с потерей трудоспособности, показатель LTIFR оставался ненулевым. В 2022–2023 гг. на фоне роста затрат на охрану труда и промышленную безопасность предприятие достигает нулевых значений по LTIFR и отсутствия зарегистрированных несчастных случаев с потерей трудоспособности. В 2024 г. этот результат сохраняется, при том, что общие затраты на безопасность несколько снижаются по сравнению с пиковыми значениями предыдущего периода. Такой профиль дает возможность оценивать не только факт снижения травматизма, но и устойчивость достигнутого уровня безопасности.

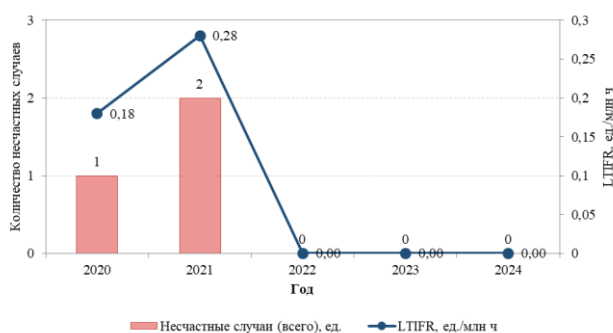
При интерпретации результатов учитывалась специфика именно бериллиевого производства. В отличие от классических металлургических участков, где доминируют термические и механические риски (расплавы, грузоподъемные и стропальные операции, работа в горячих зонах), бериллиевый передел характеризуется дополнительным токсикологическим фактором – образованием и переносом аэрозолей бериллия [8]. Контроль пылегазовой среды, работоспособность аспирационных систем, герметичность технологических узлов и дисциплина персонала при обращении с пылеобразующими операциями в этом случае оказывают такое же влияние на безопасность, как экранирование горячих зон или модернизация грузоподъемных средств. По этой причине экономические данные по затратам на охрану труда рассматривались не формально, а именно как признак того, насколько последовательно предприятие инвестировало в инженерные барьеры, санитарно-гигиеническую защиту рабочих мест и управляемость работ повышенной опасности [9,10].

В совокупности такой подход позволил оценить, носит ли зафиксированное снижение частоты травм с потерей трудоспособности (в том числе достижение и удержание LTIFR на уровне 0,00) случайный характер, или же оно согласуется по времени с системными техническими и организационными мерами, внедренными в АО «УМЗ» в рассматриваемый период.

## Результаты и их обсуждение

Анализ данных АО «УМЗ» за период 2020–2024 гг. показывает выраженное улучшение показателей охраны труда и промышленной безопасности. В 2020 г. на предприятии был зарегистрирован один несчастный случай с потерей трудоспособности; показатель LTIFR составил 0,18 случая на 1 млн отработанных человеко-часов. В 2021 г. число несчастных случаев увеличилось до двух, а LTIFR вырос до 0,28<sup>1</sup>, что является максимальным значением за рассматриваемый период.

Тем не менее, уже начиная с 2022 г. предприятие демонстрирует принципиально иную картину: в 2022, 2023 и 2024 гг. несчастные случаи с потерей трудоспособности не регистрировались, а показатель LTIFR стабильно равен 0,00 (рис. 1).



**Рисунок 1.** Динамика показателей травматизма (число несчастных случаев и LTIFR) в бериллиевом производстве АО «УМЗ» за 2020–2024 гг.

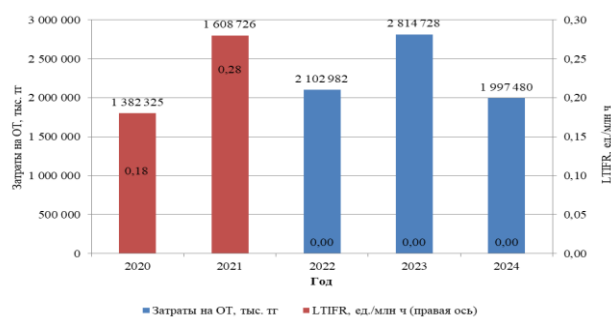
**Figure 1.** Dynamics of occupational injury indicators (number of incidents and LTIFR) in the beryllium production of UMP JSC, 2020–2024

Следовательно, за четырехлетний интервал 2021–2024 гг. на предприятии удалось снизить частоту травм с потерей трудоспособности с 0,28 до 0,00 и удерживать этот уровень последовательно три года подряд (2022–2024 гг.). В контексте высокоопасного бериллиевого производства это принципиально важный результат. Отсутствие зарегистрированных случаев с потерей трудоспособности на протяжении нескольких лет

<sup>1</sup> Производственная безопасность. АО «Ульбинский металлургический завод». – Ulba.kz. – 2025. – Режим доступа: <https://www.ulba.kz/ru/proizvodstvennaia-bezopasnost> (дата обращения: 28.10.2025).

подряд обычно не может быть объяснено только статистической дисперсией. Как правило, такая динамика отражает системные изменения в управлении рисками и дисциплине выполнения работ повышенной опасности.

Для интерпретации достигнутых значений травматизма необходимо учитывать экономическую сторону вопроса. На рисунке 2 показана динамика совокупных затрат на охрану труда и промышленную безопасность (далее – затраты на ОТ) за те же годы. В 2020 г. объем затрат на ОТ составил 1 382 325 тыс. тг, в 2021 г. – 1 608 726 тыс. тг. Начиная с 2022 г. фиксируется резкое увеличение финансирования: до 2 102 982 тыс. тг в 2022 г. и до 2 814 728 тыс. тг в 2023 г. В 2024 г. расходы остаются высокими, но несколько снижаются – до 1 997 480 тыс. тг. При этом показатели травматизма остаются на нулевом уровне.



**Рисунок 2.** Затраты на охрану труда и промышленную безопасность в бериллиевом производстве АО «УМЗ», 2020–2024 гг.

**Figure 2.** Occupational safety and industrial safety spending in the beryllium production of UMP JSC, 2020–2024

Сопоставление данных по рисункам 1 и 2 позволяет выделить три характерных этапа.

Первый этап (2020–2021 гг.) можно охарактеризовать как период остаточного риска. На этом этапе регистрируются инциденты с потерей трудоспособности (1 случай в 2020 г. и 2 случая в 2021 г.), LTIFR остается ненулевым (0,18 и 0,28), а финансовые вложения в охрану труда и промышленную безопасность находятся на уровне до 1,6 млрд тенге в год. Это состояние можно считать типичным для опасного производства, где травматизм присутствует, но управляется в рамках нормативных требований.

Второй этап (2022–2023 гг.) характеризуется одновременно двумя признаками: резким ростом затрат на ОТ и одновременным снижением травматизма до нулевого уровня. Уже в 2022 г. LTIFR принимает значение 0,00, несчастные случаи с потерей трудоспособности не фиксируются, и эта тенденция сохраняется в 2023 году. На эту же фазу приходится максимальный объем финансирования мер безопасности: рост затрат более чем на миллиард тенге по сравнению с уровнем 2020 года. Такой сдвиг интерпретируется как фаза интенсивного вмешательства, когда предприятие последовательно усиливает технические и организационные барьеры на ключевых операциях бериллиевого передела.

Для АО «УМЗ» это, как правило, включает модернизацию и экранирование опасных участков, повышение надежности грузоподъемных средств и оснастки, ужесточение контроля горячих, газоопасных и стропальных работ, внедрение процедур энергообобщения оборудования при обслуживании, а также усиление аспирации и локальных отсосов на операциях с образованием токсичной бериллиевой пыли. Существенным элементом является и дисциплина допуска к работам повышенной опасности, то есть управляемость человеческим фактором. Такой тип мероприятий, судя по временной привязке, оказывается достаточным для того, чтобы вывести показатель LTIFR на нулевой уровень и исключить случаи потери трудоспособности.

Третий этап (2024 г.) можно рассматривать как этап удержания достигнутого состояния риска. В 2024 г. предприятие сохраняет нулевые значения LTIFR и отсутствие несчастных случаев с потерей трудоспособности, при этом прямые затраты на охрану труда и промышленную безопасность несколько снижаются по сравнению с пиковыми значениями 2023 года. Это указывает на переход от режима «догоняющих инвестиций», когда ключевые барьеры строятся и внедряются, к режиму сопровождения и контроля уже внедренной системы. Экономически это означает, что значительная часть риска была снята за счет одноразовых или капиталоемких мер, после чего поддер-

жание достигнутого уровня безопасности требует относительно меньших, но стабильных эксплуатационных расходов.

С инженерно-управленческой точки зрения, такая динамика согласуется с принципом ALARP (As Low As Reasonably Practicable): частота тяжелых травм снижается до практически нулевого уровня, а дальнейшее ее уменьшение требует несопоставимого роста затрат по сравнению с дополнительным выигрышем по безопасности. В этих условиях последующие ресурсы рационально направлять не на постоянную установку новых барьеров, а на удержание достигнутого уровня за счет контроля дисциплины, своевременного обслуживания оборудования и поддержания эффективности инженерных систем защиты (систем аспирации, локальных укрытий, блокировок, ограждений и т.д.).

Полученные результаты имеют и экономическое значение. Каждый тяжелый инцидент несет комбинированный ущерб: это не только потеря трудоспособности работника и прямые компенсационные выплаты, но также вынужденный простой технологического участка, возможный перезапуск уникального оборудования, риск неконтролируемого выброса пыли бериллия и, как следствие, претензии со стороны надзора. На этом фоне рост затрат на охрану труда и промышленную безопасность до 2,1–2,8 млрд тенге в 2022–2023 гг. может рассматриваться как инвестиция в предотвращение потенциально значительно более высоких потерь. Факт того, что после пика затрат предприятие смогло удержать нулевой травматизм и одновременно скорректировать уровень расходов (2024 г.) без ухудшения показателей безопасности, указывает на положительную отдачу от этих инвестиций.

Следует отметить ограничения проведенного анализа.

Во-первых, в работе использовались сводные данные предприятия без детализации по видам происшествий, цехам и факторам травмирования. Это не позволяет в явном виде установить, какие именно классы рисков (термические ожоги, травмы при стропально-грузоподъемных операциях,

воздействие аэрозолей бериллия и т.д.) были устранены или снижены в наибольшей степени.

Во-вторых, оценка ограничена показателями, относящимися к инцидентам с потерей трудоспособности. Легкие травмы без потери трудоспособности, микротравмы, а также сообщения о потенциально опасных ситуациях (near miss) в текущий анализ не включены. Наконец, исследование опирается на внутреннюю отчетность предприятия; при интерпретации результатов следует учитывать полноту и единообразие корпоративной регистрации событий по годам.

Тем не менее, общая картина, сформированная на основе объективных производственных показателей, однозначна: в АО «УМЗ» за период 2020–2024 гг. достигнуто и удержано устойчивое нулевое значение показателя LTIFR при одновременном росте, а затем оптимизации инвестиций в охрану труда и промышленную безопасность. Это позволяет рассматривать безопасность не как побочный аспект производственной деятельности, а как управляемый элемент производственной эффективности.

### Заключение

Основным результатом проведенного исследования является установление устойчивой взаимосвязи между ростом целевых затрат на охрану труда и промышленную безопасность и снижением показателя LTIFR до нулевых значений в бериллиевом производстве АО «УМЗ», а также сохранением достигнутого уровня риска при последующей оптимизации расходов. Показано, что последовательная реализация инженерных и организационно-поведенческих мер обеспечивает снижение частоты травм с потерей трудоспособности от 1–2 случаев в год (LTIFR 0,18–0,28 в 2020–2021 гг.) до LTIFR = 0,0 и отсутствия случаев в 2022–2024 гг.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что нулевые значения LTIFR в течение трех последовательных лет являются не случайной статистической вариацией, а проявлением системного эффекта от совокупности реализованных мер. Ключевыми факторами эффективности выступили: модерниза-

ция инженерных барьеров на критических операциях бериллиевого передела (аспирация и локальные отсосы, герметизация узлов, экранирование и блокировки), повышение управляемости работ повышенной опасности (горячие, газоопасные, стропально-грузоподъемные, процедуры ЛОТО), а также укрепление дисциплины и культуры безопасного поведения. Удержание нулевого уровня травматизма при умеренном снижении расходов в 2024 г. указывает на переход к режиму сопровождения и контроля уже внедренной системы (ALARP), когда основная часть риска снята, а дальнейшая эффективность достигается за счет поддержания работоспособности барьеров и управленческой дисциплины.

Именно поэтому, траектория «рост инвестиций в безопасность – снижение LTIFR до нуля – последующая оптимизация затрат при удержании достигнутого уровня риска» может рассматриваться как пример экономически обоснованного применения принципа ALARP в условиях высокоопасного металлургического производства с бериллиевым переделом. Это подтверждает, что инвестиции в безопасность в данном случае выступают не только социально значимыми, но и экономически целесообразными.

С учетом полученных результатов целесообразно определить следующие приоритеты дальнейшей работы:

- углубление цифрового мониторинга состояния инженерных систем и соблюдения процедур работ повышенной опасности (аспирация, ЛОТО, допуски) с использованием предиктивной аналитики;
- таргетированное обучение и наставничество с учетом стажа, профессии и участия в работах повышенной опасности;
- регулярные независимые оценки эффективности системы (внешние аудиты, peer-review критических операций);
- интеграция санитарно-гигиенических параметров (аэрозоли бериллия, эффективность фильтрации, результаты производственного контроля воздуха) в единый контур оценки риска наряду с травматизмом;
- экономическая оптимизация портфеля мер на основе маржинальной отдачи («затраты – предотвращенный ущерб»).

Перспективы дальнейших исследований связаны с построением прогнозных моделей LTIFR и опережающих индикаторов (near miss, поведенческие наблюдения, отказоустойчивость систем аспирации), оценкой долгосрочного эффекта от сочетания техни-

ческих и организационных мер в бериллиевом производстве, а также с разработкой методик сопоставления затрат на безопасность с предотвращенными потерями для обоснования оптимального уровня инвестиций.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Усикова О.В. Механизм выбора и внедрения проактивных методов управления охраной труда. *Экономика Профессия Бизнес*. 2025;1:126-131. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/mehanizm-vybora-i-vnedreniya-proaktivnyh-metodov-upravleniya-ohranoy-truda/viewer> (дата обращения: 15.10.2025).

Usikova O.V. Mechanism for selecting and implementing proactive methods of occupational safety management. *Economy Profession Business*. 2025;1:126-131. (in Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/mehanizm-vybora-i-vnedreniya-proaktivnyh-metodov-upravleniya-ohranoy-truda/viewer> (accessed: 15.10.2025).

2. Кузнецова Е.А. Обзор научных исследований в области управления безопасностью: международный опыт. *Креативная экономика*. 2024;18(12):3933-3954. <https://doi.org/10.18334/ce.18.12.122450>

Kuznetsova E.A. Review of research in the field of safety management: international experience. *Creative Economy*. 2024;18(12):3933-3954. (in Russ.). <https://doi.org/10.18334/ce.18.12.122450>

3. Зуева А.А. Создание проактивной культуры безопасности на промышленном предприятии посредством внедрения поведенческого аудита безопасности. *Путь в науку. Прикладные науки. Промышленность*. 2024;55:182-184. Режим доступа: [https://journals.psu.by/specialists\\_industry/article/view/6964](https://journals.psu.by/specialists_industry/article/view/6964) (дата обращения: 15.10.2025).

Zueva A.A. Creating a proactive safety culture at an industrial enterprise through the introduction of behavioral safety audits. *The Path to Science. Applied Sciences. Industry*. 2024;55:182-184. (in Russ.). Available at: [https://journals.psu.by/specialists\\_industry/article/view/6964](https://journals.psu.by/specialists_industry/article/view/6964) (accessed: 15.10.2025).

4. Suhara A., Nanda R.A., Dewadi F.M., Karyadi K. Risk Management in the manufacturing production process: integration of automation technology and machine safety. *Public Health and Safety International Journal*. 2024;4(2):164-167. <https://doi.org/10.55642/phasij.v4i02.884>

5. Qureshi M. Building proactive organizational resilience against the risk of major process safety incidents. *Process Safety Progress*. 2022;42:48-55. <https://doi.org/10.1002/prs.12411>

6. Reader T., Mearns K., Lopes C., Kuha J. Organizational support for the workforce and employee safety citizenship behaviors: A social exchange relationship. *Human Relations*. 2017;70:362-385. <https://doi.org/10.1177/0018726716655863>

7. Искаков М.М., Медведева Ю.М. Анализ динамики травматизма и промышленной безопасности на уранодобывающем предприятии. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(3):108-115. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-09>

Iskakov M.M., Medvedeva Yu.M. Analysis of injury dynamics and industrial safety at a uranium mining enterprise. *Nuclear Safety*. 2025;15(3):108-115. (in Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-09>

8. Токбергенев Е.Т., Досмухаметов А.Т., Аскараров К.А., Амрин М.К., Аскараров Д.М., Бейсенбинова Ж.Б. Оценка аэрогенного риска для здоровья населения, проживающего в регионе расположения Ульбинского металлургического завода. *Анализ риска здоровью*. 2022;4:45-55. Режим доступа: <https://journal.fcrisk.ru/sites/journal.fcrisk.ru/files/upload/article/646/health-risk-analysis-2022-4-4.pdf> (дата обращения: 15.10.2025).

Tokbergenov E.T., Dosmukhametov A.T., Askarov K.A., Amrin M.K., Askarov D.M., Beysenbinova Zh.B. Assessment of aerogenic health risk for the population living in the region of the ulba metallurgical plant location. *Health Risk Analysis*. 2022;4:45-55. (in Russ.). Available at: <https://journal.fcrisk.ru/sites/journal.fcrisk.ru/files/upload/article/646/health-risk-analysis-2022-4-4.pdf> (accessed: 15.10.2025).

9. Егорова А.И., Яковлев В.А. Роль охраны труда в увеличении производительности и экономической эффективности. *Московский экономический журнал*. 2024;3:515-525. Режим доступа: <https://ecience.ru/en/nauka/article/81696/view> (дата обращения: 15.10.2025).

Egorova A.I., Yakovlev V.A. The role of occupational safety in increasing productivity and economic efficiency. *Moscow Economic Journal*. 2024;3:515-525. (in Russ.). Available at: <https://ecience.ru/en/nauka/article/81696/view> (accessed: 15.10.2025).

10. Горина М.С. Оценка рисков и угроз экономической безопасности предприятия. *Естественно-гуманитарные исследования*. 2024;3(53):113-119. Режим доступа: <https://academiyadt.ru/wp-content/uploads/egi/egi-53.pdf> (дата обращения: 15.10.2025).

Gorina M.S. Risk and threat assessment of an enterprise's economic security. *Natural and Humanitarian Studies*. 2024;3(53):113-119. (in Russ.). Available at: <https://academiyadt.ru/wp-content/uploads/egi/egi-53.pdf> (accessed: 15.10.2025).

## ВКЛАД АВТОРОВ:

**Идрисов Т.Ш.** – изучение проблематики, формирование методического аппарата анализа и оценки предметной области исследования, написание текста статьи;

**Коптелов М.В.** – концептуализация и качественная разработка исследования, внесение корректив и уточнений в работу.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Таир Шингысканович Идрисов**, главный технический руководитель по охране труда и охране окружающей среды Бериллиевого производства АО «Ульбинский металлургический завод» АО «НАК «Казатомпром», г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; магистр, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: idrisovts@ulba.kz

**Матвей Викторович Коптелов**, кандидат экономических наук, Н начальник информационно-аналитического центра ОСЧС, Частное учреждение по информационно-аналитическому обеспечению «Ситуационно-кризисный Центр Росатома», г. Москва, Российская Федерация; доцент кафедры № 71 Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: MKoptelov@skc.ru

## AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Idrisov T.Sh.** – studying the issues, developing of a methodological framework for analyzing and evaluating the subject area of research, writing the article's text;

**Koptelov M.V.** – conceptualisation and qualitative development of the research, making adjustments and clarifications to the work.

## FUNDING:

The study had no external funding.

## CONFLICT OF INTEREST:

There is no conflict of interest.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Tair Sh. Idrisov**, Chief Technical Officer of Labor and Environmental Protection, Berillyevo Production, Ulba Metallurgical Plant JSC, Kazatomprom JSC, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; Master's Degree, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.

email: idrisovts@ulba.kz

**Matvey V. Koptelov**, Can. Sci. (Econ.), Head of the Information and Analytical Centre, Situational and Crisis Centre of State Corporation Rosatom, Moscow, Russian Federation; Associate Professor of Department №71, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.

e-mail: MKoptelov@skc.ru

Поступила в редакцию / Received 26.11.2025

После доработки / Revision 20.02.2026

Принята к публикации / Accepted 24.02.2026

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

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-11>

УДК 621.039.58: 658.3: 621.311

EDN LYBYSZ

Оригинальная статья / Original paper




**Механизмы габитуализации культуры безопасности в сети  
предприятий – маркетинговых партнеров атомной отрасли**

М.В. Головко<sup>1</sup>  , В.А. Руденко<sup>2</sup> , М.В. Рябышев<sup>2</sup> , А.В. Анцибор<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Кубанский государственный аграрный университет, г. Краснодар, Краснодарский край, Российская Федерация

<sup>2</sup>Волгодонский инженерно-технический институт-филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская область, Российская Федерация

 [golovko178@mail.ru](mailto:golovko178@mail.ru)





**Аннотация.** Введение. Культура безопасности в атомной отрасли традиционно рассматривается применительно к отдельным предприятиям. Однако в условиях, когда ключевой игрок – Государственная корпорация «Росатом» – выстраивает деятельность через разветвленную сеть партнерских организаций (подрядчиков, поставщиков, научные и сервисные структуры), возникает задача трансляции единых стандартов безопасности за пределы головной компании. Цель настоящего исследования – выявить и систематизировать механизмы, с помощью которых внешние нормативные требования преобразуются в устойчивые внутренние практики организаций-партнеров, то есть механизмы габитуализации культуры безопасности в партнерской сети. Методы. Исследование выполнено в качественной парадигме с опорой на концепцию габитуса П. Бурдьё, теорию заинтересованных сторон и неинституциональный подход. Эмпирическую базу составили корпоративные отчеты Росатома в области безопасности, отраслевые стандарты, материалы профильных организаций. Результаты. Выделено четыре ключевых механизма габитуализации. Во-первых, нормативно-ценностное структурирование, при котором ценности безопасности последовательно конкретизируются в политиках, стандартах и квалификационных требованиях, охватывающих всех участников сети. Во-вторых, измерительная прозрачность, где внедрение системы ключевых показателей и публичная отчетность создают среду и данные становятся основой для решений и обратной связи. В-третьих, инвестиционная рутинизация, при которой устойчивый рост затрат на охрану труда и окружающей среды и их проектная детализация превращают безопасность из декларации в неотъемлемый элемент производственного бюджета. В-четвертых, ответственность за полный жизненный цикл, реализуемая через федеральные целевые программы, позволяющие вовлекать партнеров в решение задач по обращению с наследием, реабилитации территорий и «зеленые» практики. Данные механизмы образуют многоуровневую систему вовлечения, где глубина интеграции партнера зависит от его роли – от базового контрактного соответствия до стратегического соинвестирования. Выводы. Полученные результаты показывают, что формирование единой культуры безопасности в распределенной сети требует не только принудительного навязывания правил, но и создания условий, при которых безопасность становится органичной частью организационного габитуса партнеров.

**Ключевые слова:** культура безопасности, габитуализация, партнерская сеть, атомная отрасль, Росатом, нормативное структурирование, ключевые показатели эффективности (KPI), инвестиции, жизненный цикл, экологическая ответственность

**Для цитирования:** Головко М.В., Руденко В.А., Рябышев М.В., Анцибор А.В. Механизмы габитуализации культуры безопасности в сети предприятий – маркетинговых партнеров атомной отрасли. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(1):99–109. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-11>


**For citation:** Golovko M.V., Rudenko V.A., Ryabyshev M.V., Antsbior A.V. Habitualization mechanisms of safety culture in the network of the nuclear industry's marketing partners. *Nuclear Safety*. 2026;16(1):99–109. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-11>

## Habitualization mechanisms of safety culture in the network of the nuclear industry's marketing partners

Mariya V. Golovko<sup>1</sup> , Valentina A. Rudenko<sup>2</sup> , Mikhail V. Ryabyshev<sup>2</sup> ,  
Anna V. Antsibor<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Krasnodar krai, Russian Federation

<sup>2</sup>Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,  
Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation

 golovko@mail.ru

**Abstract.** Introduction. Safety culture in the nuclear industry is traditionally considered in relation to individual enterprises. However, in a situation where the key player – Rosatom State Corporation – organises its activities through an extensive network of partner organisations (contractors, suppliers, scientific and service structures), the task arises of transmitting uniform safety standards beyond the parent company. The objective of this study is to identify and systematise the mechanisms by which external regulatory requirements are transformed into sustainable internal practices of partner organisations, i.e. the mechanisms of habitualization of safety culture in the partner network. Methods. The study is conducted in a qualitative paradigm based on Pierre Bourdieu's concept of habitus, stakeholder theory, and the neo-institutional approach. The empirical basis is formed by Rosatom's corporate reports on safety, industry standards, and materials from relevant organisations. Results. Four key mechanisms of habitualization have been identified. First, normative and value structuring, in which safety values are consistently specified in policies, standards, and qualification requirements covering all network participants. Second, measurement transparency, where the introduction of a system of key indicators and public reporting creates an environment and data become the basis for decisions and feedback. Thirdly, investment routinisation, whereby the steady growth in occupational health and safety and environmental costs and their project detailing transform safety from a declaration into an integral part of the production budget. Fourth, responsibility for the entire life cycle, implemented through federal target programmes that allow partners to be involved in addressing issues related to heritage management, land rehabilitation and green practices. These mechanisms form a multi-level engagement system, where the depth of partner integration depends on their role – from basic contract compliance to strategic co-investment. Conclusions. The results obtained show that the formation of a unified security culture in a distributed network requires not only the enforcement of rules, but also the creation of conditions under which security becomes an integral part of the organisational habitus of partners.

**Keywords:** safety culture, habitualization, partner network, nuclear industry, Rosatom, regulatory structuring, key performance indicators (KPIs), investments, life cycle, environmental responsibility

### Введение

Культура безопасности в атомной отрасли формируется не изолированно в рамках отдельного предприятия, а через сложную систему взаимодействия и взаимовлияния в партнерской сети. Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» (далее – Росатом), выступая системообразующим центром этой сети, реализует целенаправленные механизмы гармонизации и укоренения единых ценностных и поведенческих стандартов безопасности среди всех участников производственной цепочки. Этот процесс можно обозначить как механизмы габитуализации, то есть перевода внешних требований и норм в устойчивые внутренние практики и установки организаций-партнеров.

Основой такого подхода является системное видение безопасности как комплексной категории, охватывающей не только ядер-

ную, радиационную и промышленную безопасность, но и охрану труда, экологическую ответственность, а также человеческий фактор [1–4]. Как следует из отчетных данных Росатома за 2022–2024 гг., корпорация формирует единое нормативное и методическое поле. Через такие инструменты, как единые отраслевые стандарты, типовые системы управления охраной труда и утвержденные программы обучения, задаются общие рамки деятельности. Эти документы становятся базой для интеграции требований во внутренние процессы подрядных организаций, научно-исследовательских институтов и других стейкхолдеров Росатома, формируя общий подход к пониманию рисков и самоидентификации в системе безопасности [5].

Ключевые механизмы габитуализации включают вовлечение, обучение и цифровизацию. Отраслевые мероприятия (слеты,

школы, советы) способствуют неформальному усвоению ценностей. Внедрение единых цифровых платформ требует от партнеров приведения своих процессов к общим стандартам. Немаловажную роль играет формирование доверия через открытую публикацию данных и прозрачность. Подрядные организации, действующие на объектах «Росатома», обязаны соблюдать требования корпоративной системы управления охраной труда, что закрепляется договорными отношениями. Таким образом, внешнее поначалу правило становится внутренним регламентом партнера, а со временем – частью его собственной операционной культуры.

Результатом становится не просто формальное соответствие требованиям, а глубинное усвоение принципов безопасности, которые начинают воспроизводиться участниками сети самостоятельно, обеспечивая устойчивость и целостность всей системы.

### Методология и методы

В основе исследования лежит подход, рассматривающий культуру безопасности как формируемый социальный конструкт (П. Бурдье) [6]. В качестве методологического кейса для анализа выбран Росатом и его партнерская сеть. Использован качественный анализ корпоративных отчетов по безопасности (2022–2024 гг.)<sup>1</sup>, стандартов (СТО), политик и материалов отраслевых мероприятий. Для интерпретации механизмов влияния ядра сети на партнеров применены элементы теории заинтересованных сторон (Р.Э. Фримен) [7] и неонинституциональной теории (П. Димаджио, Д. Олдрича)

<sup>1</sup> Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». Отчет о безопасности за 2022 год [Электронный ресурс]. – Москва, 2023. – Режим доступа: [https://report.rosatom.ru/go/rosatom/go\\_rosatom\\_2022/rosatom\\_2022\\_5.pdf?ysclid=mjclnsile458760530](https://report.rosatom.ru/go/rosatom/go_rosatom_2022/rosatom_2022_5.pdf?ysclid=mjclnsile458760530) (дата обращения: 11.11.2025); Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». Отчет о безопасности за 2023 год [Электронный ресурс]. – Москва, 2024. – Режим доступа: [https://report.rosatom.ru/go/rosatom/go\\_rosatom\\_2023/app/rosatom\\_2023\\_5.pdf?ysclid=mj88v31nav906829145](https://report.rosatom.ru/go/rosatom/go_rosatom_2023/app/rosatom_2023_5.pdf?ysclid=mj88v31nav906829145) (дата обращения: 11.11.2025); Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». Отчет о безопасности за 2024 год [Электронный ресурс]. – Москва, 2025. – Режим доступа: [https://report.rosatom.ru/go/rosatom/go\\_rosatom\\_2024/app/rosatom\\_2024\\_5.pdf?ysclid=mj88z79ara775100297](https://report.rosatom.ru/go/rosatom/go_rosatom_2024/app/rosatom_2024_5.pdf?ysclid=mj88z79ara775100297) (дата обращения: 11.11.2025).

[8,9]. Концептуальной рамкой послужили подходы МАГАТЭ к культуре безопасности (INSAG-4)<sup>2</sup> и ее измерению и построению [10,11].

### Результаты и обсуждение

Основой формирования единой культуры безопасности в распределенной сети Росатома является перевод абстрактных ценностей в систему формальных правил. Этот механизм создает единое нормативное поле, обеспечивая конвергенцию поведения всех участников – от головных предприятий до подрядчиков. Процесс выстраивается по четкой многоуровневой цепочке, где каждый этап конкретизирует и формализует требования к безопасности (табл. 1).

Внедрение единых правил обеспечивается строгими процедурами подтверждения компетентности (табл. 2).

Механизм нормативно-ценностного структурирования превращает безопасность из лозунга в совокупность детализированных, обязательных и проверяемых правил. Унификация через политики, стандарты и систему допусков обеспечивает адаптацию всех участников сети к единым поведенческим стандартам, создавая фундамент для габиитуализации культуры безопасности.

Культура безопасности в распределенной сети предприятий не может опираться только на формальные правила. Она требует постоянной обратной связи и объективного измерения. Механизм ключевых показателей эффективности (key performance indicators, KPI) трансформирует абстрактную цель безопасности в систему управляемых, измеримых и публично верифицируемых показателей. Это создает транспарентную среду, где решения базируются на данных, а каждый участник сети обладает каналами для сообщения о рисках. Комплекс количественных оценок (метрик) выполняет три ключевые функции: измерение состояния, установление целевых значений и обеспечение сравнимости (табл. 3).

<sup>2</sup> Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ). Культура безопасности (INSAG-4). – Вена: МАГАТЭ, 1991. – Режим доступа: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub882r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub882r_web.pdf) (дата обращения: 11.11.2025).

**Таблица 1.** Уровни нормативно-ценностного структурирования в Росатоме (составлено авторами)**Table 1.** Levels of normative and value structuring in Rosatom (compiled by the authors)

Уровень	Инструменты	Содержание	Объекты воздействия
Ценностный	Система ценностей Росатома	«Безопасность – наивысший приоритет». Формирование идеологической основы	Все сотрудники и организации
Управленческий	Единая отраслевая политика в области охраны труда	Определение целей, принципов и обязательств. Прямое распространение на подрядчиков и субподрядчиков	Все организации сети, включая контрагентов
Технический	Система отраслевых стандартов и нормативов (СТО, ГОСТ Р)	Детализация требований к процессам, оборудованию, материалам (обоснование безопасности, контроль, метрология)	Все процессы жизненного цикла объектов
Квалификационный	Система аттестации персонала и аккредитации организаций	Подтверждение компетенций. Аккредитация лабораторий и органов по сертификации	Персонал и организации, выполняющие критически важные работы

**Таблица 2.** Ключевые показатели системы стандартизации и подтверждения соответствия 2022–2024 гг. (составлено авторами по материалам отчетов о безопасности Росатома)**Table 2.** Key indicators of the standardization and conformity assessment system for 2022–2024 (compiled by the authors based on Rosatom safety reports)

Направление деятельности	Результаты за 2022–2024 гг.	Эффект для партнерской сети
Стандартизация	Утверждено 46 стандартов, а также пакет документов по стандартизации в области ядерной безопасности, сварочных работ и метрологии.	Создание единого «технического языка» и требований для всех участников сети.
Аттестация персонала	Проведено 37 156 аттестаций, выдано 10 353 аттестационных удостоверения.	Гарантия одинаково высокого уровня квалификации специалистов, независимо от их организационной принадлежности.
Аккредитация организаций	Аккредитовано 11 органов по сертификации и 65 испытательных лабораторий на конец периода. Приостановлено 7 аттестатов аккредитации за период.	Формирование доверенной сети поставщиков экспертных услуг, отвечающих единым критериям.
Инкорпорация передовых принципов (Vision Zero)	Участие в программе Vision Zero с 2019 г., согласовано 5 обучающих программ, обучено 731 работник, принят принцип как основа отраслевой программы развития культуры безопасности.	Задание долгосрочной нормативной рамки и идеологии для всех программ по охране труда в сети.

**Таблица 3.** Система ключевых показателей безопасности в Росатоме 2022–2024 гг. (составлено авторами по материалам отчетов о безопасности Росатома)**Table 3.** Rosatom's key safety performance indicators 2022–2024 (compiled by the authors based on Rosatom's safety reports)

Категория показателя	Конкретный показатель (KPI)	2022 г.	2023 г.	2024 г.	Назначение и управленческий смысл
Ядерная и радиационная безопасность	Отсутствие событий выше уровня «1» по шкале INES <sup>3</sup>	Достигнуто	Достигнуто	Достигнуто	Ключевой индикатор безаварийной эксплуатации. Абсолютный приоритет, публичная демонстрация надежности
Охрана труда (проактивные метрики)	LTIFR <sup>4</sup>	0,11	0,06	0,07	Позволяет сравнивать уровень безопасности с мировыми компаниями. Цель – постоянное снижение

<sup>3</sup> INES (International Nuclear and Radiological Event Scale) – Международная шкала ядерных и радиологических событий.<sup>4</sup> LTIFR (Lost Time Injury Frequency Rate) – коэффициент частоты травматизма с потерей рабочего времени.

Продолжение таблицы 3

Table 3 continuation

Категория показателя	Конкретный показатель (KPI)	2022 г.	2023 г.	2024 г.	Назначение и управленческий смысл
Охрана труда (проактивные метрики)	Коэффициент частоты травм (Кч)	0,25	0,19	0,27	Отражает общий уровень производственного травматизма. Динамика служит основой для корректирующих мер
Персональные риски	Охват персонала оценкой индивидуального радиационного риска (система АРМИР <sup>5</sup> )	65 729 человек	70 071 человек	69 020 человек	Переход от коллективных к персонифицированным рискам. Основа для точечных профилактических мероприятий

Эти KPI являются не просто констатацией фактов, а инструментом управления. Например, публичное заявление об отсутствии инцидентов на INES выше первого уровня – это одновременно и результат, и обязательство, создающее репутационное давление для его сохранения. Динамика LTIFR позволяет объективно оценивать эффективность программ по охране труда на фоне изменяющейся структуры производства и численности персонала. Система АРМИР оценивает не полученные, а будущие индивидуальные радиационные риски, переводя мониторинг в проактивное прогнозирование. Институт «горячей линии» и гарантированный отказ от опасных работ без санкций трансформируют роль работника из пассивного исполнителя в активный контролирующий элемент. Мониторинг становится инструментом предупреждения, сочетающим машинный расчет и человеческую экспертизу, а полученные данные используются для эффективного управления. Расследование каждого инцидента завершается не отчетом, а приказом с конкретными профилактическими мерами, превращая негативный опыт в источник обучения для всей сети. Обобщенные данные определяют стратегические цели на отраслевых форумах. Публичная прозрачность, включая обнародование негативных показателей, формирует доверие внутри сети и демонстрирует ответственность перед обществом и регулятором.

В рамках выстраивания культуры безопасности в масштабной партнерской сети декларативных принципов и систем мониторинга недостаточно. Решающую роль играет целенаправленная и системная инвестиционная политика, превращающая безопасность из статьи расходов в неотъемлемую часть производственного процесса. Устойчивые и возрастающие финансовые потоки материализуют заявленный приоритет безопасности в конкретных объектах, оборудовании и мероприятиях. Это формирует организационный «габитус» – устойчивую практику, при которой крупные вложения в превентивные меры воспринимаются не как обременительные затраты, а как абсолютная норма и условие для ведения любой деятельности.

Экономическое измерение приоритета безопасности становится очевидным при анализе динамики затрат. Как показывают данные отчетов, Росатом последовательно наращивает финансирование ключевых направлений (табл. 4). Особенно показателен рост совокупных затрат на охрану окружающей среды, которые за рассматриваемый период увеличились на 47,8 %, более чем на 12,4 млрд руб., достигнув в 2024 г. 36,4 млрд руб. Этот рост во многом обеспечен масштабными инвестициями в основной капитал природоохранного назначения, такие как строительство и модернизация очистных сооружений. Параллельно сохраняются значительные, исчисляемые десятками миллиардов рублей, расходы на охрану труда.

<sup>5</sup> АРМИР (автоматизированная радиационно-медицинская информационная регистрация) – информационно-аналитическая система для оценки индивидуальных радиационных рисков персонала, работающего в условиях ионизирующего излучения. Высокотехнологичный «цифровой профиль здоровья» для работников атомной отрасли.

**Таблица 4.** Динамика ключевых финансовых показателей в области безопасности Росатома 2022–2024 гг. (составлено авторами по материалам отчетов о безопасности Росатома)

**Table 4.** Dynamics of Rosatom's key financial performance indicators in the field of safety 2022–2024 (compiled by the authors based on Rosatom's Safety Reports)

Направление расходов	Год			Изменение, %
	2022 г.	2023 г.	2024 г.	
Затраты на охрану труда, млрд руб.	н/д	16,5	20,4	23,6
Затраты на охрану окружающей среды, млрд руб.	24,7	29,0	36,4	47,8
<i>в т.ч. затраты на природоохранную деятельность</i>	19,8	22,5	30,1	52,4
<i>в т.ч. инвестиции в основной капитал природоохранного назначения</i>	4,9	6,5	6,3	29,4

Важно понимать, что эти средства не являются абстрактными траншами. Каждая сумма направлена на конкретные, осязаемые статьи, формирующие инфраструктуру безопасности. Так, рост затрат на охрану труда в 2024 г. был обусловлен, среди прочего, проведением специальной оценки условий труда на новых рабочих местах, закупкой дополнительных средств индивидуальной защиты (СИЗ) по результатам оценки рисков и реализацией организационно-технических мероприятий по улучшению условий труда. В экологической сфере почти половина всех затрат (44,3 %) традиционно направляется на обеспечение радиационной безопасности, что включает в себя финансирование систем мониторинга, модернизацию оборудования и выполнение мероприятий по минимизации воздействия на окружающую среду. Подобная детализация расходов демонстрирует переход от общих бюджетных резервов к точечному, проектному финансированию конкретных задач по снижению рисков.

Сформировавшийся инвестиционный «габитус» проявляется в долгосрочных вложениях в инфраструктуру безопасности. Это не текущие расходы, а стратегические инвестиции в устойчивость, которые включают модернизацию систем физической защиты по руководящим материалам МАГАТЭ<sup>6</sup>, строительство объектов по обращению

с РАО и ОЯТ (например, опытно-демонстрационного центра по переработке) и технологическое переоснащение лабораторий контроля. Таким образом, экономические и ресурсные стимулы формируют прочную основу для единых стандартов поведения в партнерской сети. Когда новые предприятия или подрядчики входят в эту сеть, они сталкиваются не только с набором

правил, но и с устоявшейся практикой их ресурсного обеспечения. Это убедительно демонстрирует, что соблюдение высочайших норм безопасности является обязательным и финансово обеспеченным условием участия в любой совместной деятельности, превращая инвестиции из статьи бюджета в культурную норму и операционный стандарт.

Зрелость культуры безопасности в атомной отрасли определяется подходом, выходящим за рамки текущей эксплуатации. Речь идет о «зеленом подходе» к управлению развитием, проявляющимся в принятии полной ответственности за весь жизненный цикл технологий – от решения проблем прошлого до управления рисками будущих периодов. Этот принцип формирует уникальную отраслевую идентичность [12]. Ключевым инструментом является реализация Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности» (ФЦП ЯРБ-2)<sup>7</sup>. Эта программа фокусируется на задачах, не имеющих ком-

<sup>6</sup> Например, Конвенция о физической защите ядерного материала заключена в Вене 26 октября 1979 года. – Организация Объединенных Наций. – Собрание договоров. – Режим доступа: <https://treaties.un.org/doc/Publication/UNTS/Volume%201456/volume-1456-I-24631-English.pdf> (дата обращения: 12.11.2025); Рекомендации по физической ядерной безопасности, касающиеся физической защиты ядерных материалов и ядерных установок (INFCIRC/225/Revision 5) [Электронный ресурс]: документ МАГАТЭ №13. – Вена: МАГАТЭ, 2011. – Режим доступа: <https://www.iaea.org/publications/8351/recommendations-on-the-physical-protection-of-nuclear-material-and-nuclear-facilities> (дата обращения: 12.11.2025).

<sup>7</sup> Государственная программа Российской Федерации «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности» [Электронный ресурс]: утв. постановлением Правительства РФ от 19.12.2020 № 2128. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/75035442/> (дата обращения: 12.11.2025).

мерческой выгоды, но критически важных для долгосрочной безопасности страны. Ее активность демонстрирует переход от де-

клараций к конкретным действиям по закрытию «ядерного наследия» (табл. 5).

**Таблица 5.** Ключевые результаты и показатели управления наследием и долгосрочными рисками 2022–2024 гг. (составлено авторами по материалам отчетов о безопасности Росатома)

**Table 5.** Key results and indicators of legacy and long-term risk management 2022–2024 (compiled by the authors based on Rosatom safety reports)

Направление деятельности	2022 г.	2023 г.	2024 г.
Выполнение программы ЯРБ-2	Степень достижения основной цели: 35,7 % (план – 32,1 %)	Степень достижения основной цели: 38,4 % (план – 36,7 %)	Степень достижения основной цели: 40,5 % (план – 39,6 %)
Реабилитация территорий	Реабилитировано 17,8 тыс. м <sup>2</sup> радиационно загрязненных земель	Реабилитировано 8,7 тыс. м <sup>2</sup> радиационно загрязненных земель	Реабилитировано 12,5 тыс. м <sup>2</sup> радиационно загрязненных территорий
Вывод из эксплуатации объектов (ЯРОО)	Выведено из эксплуатации 3 ЯРОО	Выведено из эксплуатации 1 ЯРОО	Выведено из эксплуатации 3 ЯРОО. Всего с 2016 г. – 53 объекта
Утилизация атомного флота и обращение с ОЯТ	Утилизировано 2 АПЛ, выгружено топливо из 2 реакторов. Кондиционировано 1000 м <sup>3</sup> твердых РАО	Утилизирована 1 АПЛ, выгружено топливо из 1 реактора. Кондиционировано 1000 м <sup>3</sup> твердых РАО	Завершена утилизация 1 большой АПЛ и 1 судна техобслуживания. Кондиционировано 1000 м <sup>3</sup> твердых РАО
Обращение с ОЯТ	Переработано 139,6 тонн ОЯТ	Переработано 147,2 тонны ОЯТ	Продолжено строительство Опытного-демонстрационного центра по переработке ОЯТ

Можно сделать вывод о формировании культуры долгосрочной ответственности, проявляющейся в системности и преемственности процессов, рутинизации масштабных задач безопасности и их интеграции во все производственные процессы, ориентации на создание устойчивой инфраструктуры для следующих поколений.

«Зеленые» проекты Росатома также требуют вовлечения всех участников партнерской сети. Габитус ответственного природопользователя предполагает минимизацию негативного воздействия на окружающую среду. Этот переход от пассивного «не навреди» к активному «восстанови и сохрани» является качественным скачком в формировании отраслевой культуры (табл. 6).

**Таблица 6.** Некоторые «зеленые» практики Росатома (2022–2024 гг.) (составлено авторами по материалам отчетов о безопасности Росатома)

**Table 6.** Some of Rosatom's «green» practices (2022–2024) (compiled by the authors based on Rosatom's safety reports)

Направление деятельности	2022 г.	2023 г.	2024 г.
Восстановление земель (рекультивация)	Проведены работы по восстановлению 44,36 га нарушенных земель (напр., АО «Лунное» – 41,05 га, ПАО «НЗХК» – 2,45 га).	Рекультивировано 1,84 га нарушенных земель.	Площадь рекультивированных земель составила 0,53 га. Общая площадь нарушенных земель на конец года – 8,2 тыс. га.
Лесовосстановление	Лесовосстановительные мероприятия проведены на площади 192,7 га (АО «Хиагда» – 173,2 га, Ленинградская АЭС – 19,5 га).	Лесовосстановительные работы проведены на площади 111,99 га.	Площадь восстановленных лесов составила 1196,995 га.

Продолжение таблицы 6  
Table 6 continuation

Направление деятельности	2022 г.	2023 г.	2024 г.
Реабилитация загрязненных территорий	В рамках ФЦП ЯРБ-2 реабилитировано 110,9 тыс. м <sup>2</sup> (около 11 га) радиационно загрязненных территорий.	Выявлено 5866 м <sup>2</sup> загрязненных территорий, реабилитировано 560 м <sup>2</sup> .	Реабилитировано 12,5 тыс. м <sup>2</sup> (1,25 га). Общая площадь загрязненных территорий – 107,22 км <sup>2</sup> .
Снижение загрязнения водных объектов	Строительство и модернизация очистных сооружений (напр., ФГУП «ПСЗ», Кольская АЭС). Объем оборотной и повторно используемой воды: 37 623,7 млн м <sup>3</sup> .	Внедрение и модернизация очистных сооружений (Кольская АЭС, Волгодонск). Модернизация систем сброса (Томская область). Объем оборотной и повторно используемой воды: 37 764,1 млн м <sup>3</sup> .	Объем оборотной и повторно используемой воды: 37 442,5 млн м <sup>3</sup> . Модернизация очистных сооружений на предприятиях Машиностроительного и ЯОК дивизионов для повышения эффективности очистки.
Снижение выбросов в атмосферу	Сокращение выбросов озоноразрушающих веществ на 43 % по сравнению с предыдущими годами.	Реализация мероприятий по снижению выбросов (на 30–35 %), внедрение систем очистки (Ленинградская АЭС).	Реализованы инициативы по снижению выбросов: оснащение производств системами газоочистки, модернизация вентиляционных систем (Балаковская, Кольская АЭС), замена оборудования. Объем выбросов озоноразрушающих веществ сократился до 4,081 тонн.

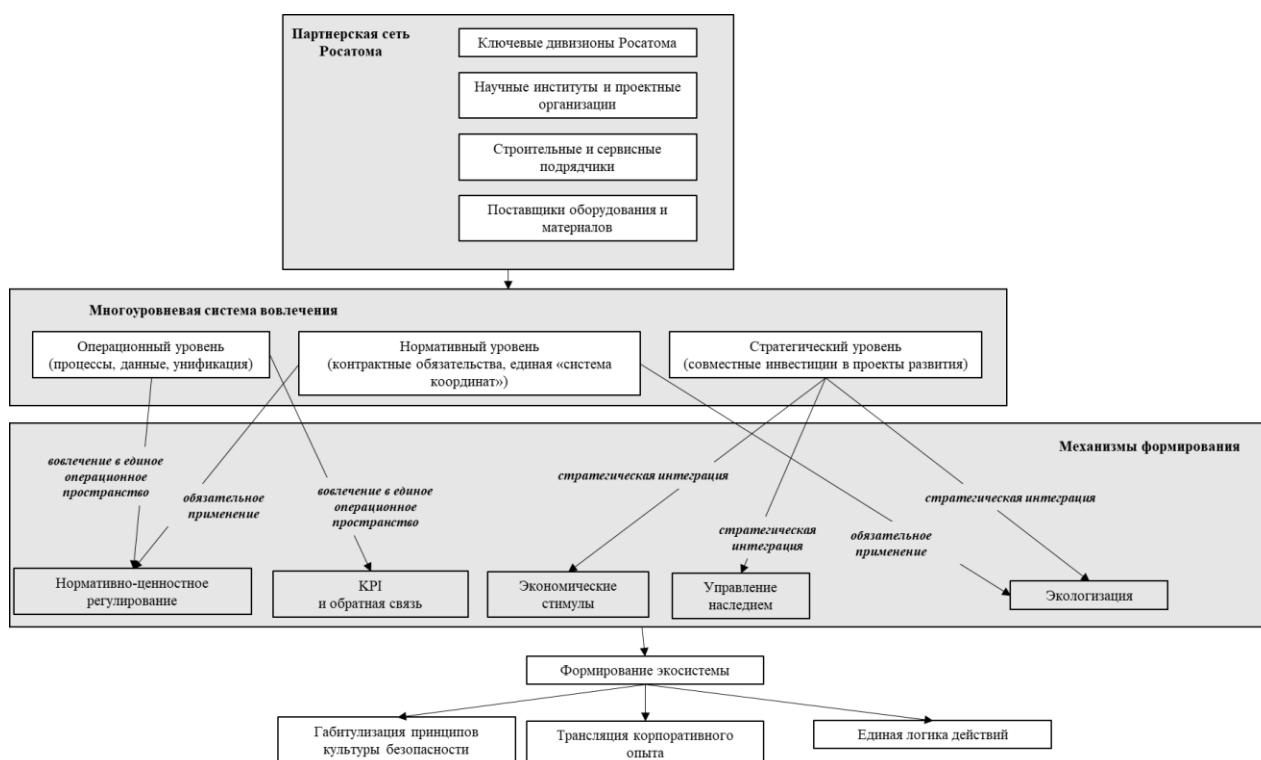
Эти практики выходят за рамки формального соблюдения законодательства и формируют вовлеченность всех заинтересованных сторон. Репутационный эффект для всей распределенной сети Росатома выражается в демонстрации технической управляемости своим воздействием на окружающую среду и наличии устойчивых корпоративных практик, при которых компенсационные мероприятия являются неотъемлемым элементом всей производственной цепочки. Подобный подход к организации деятельности всех предприятий атомной отрасли становится ключевым элементом социальной лицензии – критически важного общественного признания и согласия на деятельность корпорации.

Рассмотренные механизмы формирования культуры безопасности реализуются не внутри замкнутой вертикали, а в рамках обширной и разнородной партнерской сети, которая включает сотни организаций – от ключевых производственных дивизионов (атомные станции, машиностроительные, топливные, горнорудные предприятия) и научно-исследовательских институтов до строительных и сервисных подрядчиков, поставщиков оборудования, логистических

и инжиниринговых компаний. Эффективность габитуализации напрямую зависит от того, как эти разнородные участники вовлекаются в каждый механизм. Анализ показывает, что «Росатом» применяет дифференцированный, но системный подход, создавая многоуровневую систему вовлечения по принципу «концентрических кругов обязательств», от базовых нормативных требований для всех до глубокой проектной интеграции для ключевых участников (рис. 1).

### Заключение

Вовлечение партнерской сети носит многоуровневый характер, образуя систему обязательств от периферии (поставщики, связанные контрактами) до ядра (стратегические партнеры, связанные совместными инвестициями и программами). Через эти механизмы – контракты, данные, инвестиции, проекты – ценности и подходы Росатома к безопасности интегрируются в практики всех участников партнерской сети. Это трансформирует разрозненных контрагентов в единую экосистему безопасности, где действия каждого участника определяются общим «габитуализированным» принципом приоритета безопасности.



**Рисунок 1.** Многоуровневая система габитуализации культуры безопасности в партнерской сети Росатома (составлено авторами)

**Figure 1.** A multi-level system of habitualization of safety culture in Rosatom's partner network (compiled by the authors)

Такая институционализация безопасности на всех уровнях партнерской сети не только минимизирует операционные и репутационные риски, но и создает прочный фундамент для долгосрочной устойчивости бизнеса.

В конечном итоге, единые стандарты безопасности превращаются в значимое конкурентное преимущество, делая всю экосистему Росатома более привлекательной для надежных и технологически развитых партнеров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Головко М.В. Культура экономической безопасности и ее стратегическое значение для атомной энергетики. *Глобальная ядерная безопасность*. 2015;2(15):100-105. Режим доступа: <http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/ru.2015.2-12.pdf> (дата обращения: 15.10.2025).  
Golovko M.V. Economic safety culture and its strategic importance for nuclear power. *Global Nuclear Safety*. 2015;2(15):100-105. (In Russ.). Available at: <http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/ru.2015.2-12.pdf> (accessed: 15.10.2025).
2. Руденко В.А., Василенко Н.П. Ценностная составляющая культуры безопасности. *Глобальная ядерная безопасность*. 2013;4(9):82-86. Режим доступа: [http://gns.mephi.ru/sites/default/files/page/file/2013\\_no49\\_gyb\\_49\\_2013.pdf](http://gns.mephi.ru/sites/default/files/page/file/2013_no49_gyb_49_2013.pdf) (дата обращения: 16.10.2025).  
Rudenko V.A., Vasilenko N.P., The value component of safety culture. *Global Nuclear Safety*. 2013;4(9):82-86. (In Russ.). Available at: [http://gns.mephi.ru/sites/default/files/page/file/2013\\_no49\\_gyb\\_49\\_2013.pdf](http://gns.mephi.ru/sites/default/files/page/file/2013_no49_gyb_49_2013.pdf) (accessed: 16.10.2025).
3. Евдошкина Ю.А., Руденко В.А. Практико-ориентированная технология формирования культуры безопасности выпускников, ориентированных на работу в атомной отрасли. *Глобальная ядерная безопасность*. 2017;4(25):122-129. Режим доступа: <http://gns.mephi.ru/ru/issues/2017-425?art=384> (дата обращения: 16.10.2025).

Evodshkina Y.A., Rudenko V.A. Pedagogical model of forming safety culture of graduating students oriented to work in atomic industry. *Global Nuclear Safety*. 2017;4(25):122-129. (In Russ.). Available at: <http://gns.mephi.ru/ru/issues/2017-425?art=384> (accessed: 16.10.2025).

4. Жук А.В., Головко М.В., Евдошкина Ю.А. Отечественная и зарубежная историография проблем культуры безопасности в атомной энергетике. *Глобальная ядерная безопасность*. 2017;1(22):113-121. Режим доступа: <http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/ru.2017.1.4.5.pdf> (дата обращения: 16.10.2025).

Zhuk A.V., Golovko M.V., Evodshkina Y.A. Russian and foreign historiography of safety culture problems in nuclear power engineering. *Global Nuclear Safety*. 2017;1(22):113-121. (In Russ.). Available at: <http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/ru.2017.1.4.5.pdf> (accessed: 16.10.2025).

5. Волков Э.В., Емельянова А.В., Карякин А.М., Юникова А.В. Роль национального контекста в формировании организационной культуры безопасности атомной отрасли. *Экономика и управление: проблемы, решения*. 2021;1;5(113):26–38. Режим доступа: [https://s-lib.com/issues/eiu\\_2021\\_05\\_t1\\_a4/?ysclid=ml98lfoqjl573204607](https://s-lib.com/issues/eiu_2021_05_t1_a4/?ysclid=ml98lfoqjl573204607) (дата обращения: 17.10.2025).

Volkov E.V., Emelianova A.V., Karyakin A.M., Yunikova A.V. The role of the national context in the formation of the organizational culture of safety in the nuclear industry. *Economics and Management: Problems and Solutions*. 2021;1;5(113):26-38. (In Russ.). Available at: [https://s-lib.com/issues/eiu\\_2021\\_05\\_t1\\_a4/?ysclid=ml98lfoqjl573204607](https://s-lib.com/issues/eiu_2021_05_t1_a4/?ysclid=ml98lfoqjl573204607) (accessed: 17.10.2025).

6. Бурдые П. Практический смысл. Санкт-Петербург: Алетея, 2001. 562 с. Режим доступа: [https://yanko.lib.ru/books/cultur/bourdieu-praktich\\_smusl-81.pdf](https://yanko.lib.ru/books/cultur/bourdieu-praktich_smusl-81.pdf) (дата обращения: 17.10.2025).

Bourdieu, P. Practical Sense. St.Petersburg: Aleteia, 2001. 562 p. (In Russ.). Available at: [https://yanko.lib.ru/books/cultur/bourdieu-praktich\\_smusl-81.pdf](https://yanko.lib.ru/books/cultur/bourdieu-praktich_smusl-81.pdf) (accessed: 17.10.2025).

7. Freeman R.E. Strategic management: a stakeholder approach. London: Pitman, 1984. 276 p. Available at: <https://archive.org/details/strategicmanagem00free> (accessed: 17.10.2025).

8. Димаджо П.Дж., Пауэлл У.В. Новый взгляд на «железную клетку»: институциональный изоморфизм и коллективная рациональность в организационных полях. Перевод с английского. *Экономическая социология*. 2010;11(1):35-56. Режим доступа: [https://www.hse.ru/data/2011/12/08/1208204985/ecsoc\\_t11\\_n1.pdf](https://www.hse.ru/data/2011/12/08/1208204985/ecsoc_t11_n1.pdf) (дата обращения: 10.01.2026).

DiMaggio P.J., Powell W.W. The Iron Cage Revisited: Institutional Isomorphism and Collective Rationality in Organizational Fields. *American Sociological Review*. 1983;48(2):147-160. (In Engl.). Available at: <http://www.jstor.org/stable/2095101> (accessed: 10.01.2026).

9. Олдрич Х. Предпринимательские стратегии в новых организационных популяциях. В кн.: *Западная экономическая социология: Хрестоматия современной классики*. Москва: РОССПЭН, 2004. Р. 211-225. Режим доступа: <https://rjm.spbu.ru/article/view/719> (дата обращения: 10.01.2026).

Aldrich H. Entrepreneurial strategies in new organizational populations. In: Swedberg R. (ed.). *Entrepreneurship. The Social Science View*. Oxford University Press: Oxford, 2000. 211-228. (In Engl.). Available at: <https://rjm.spbu.ru/article/view/719> (accessed: 10.01.2026).

10. Сметник А.А., Мурлис Д.В. Менеджмент качества и культура безопасности в атомной отрасли. *Менеджмент в России и за рубежом*. 2015;4:115-123. EDN UMOMCJ. Режим доступа: <https://www.mevriz.ru/annotations/2015/4/> (дата обращения: 10.01.2026).

Smetnik A.A., Murlis D.V. Quality management and safety culture in the nuclear industry. *Management in Russia and Abroad*. 2015;4:115-123. (In Russ.). EDN UMOMCJ. Available at: <https://www.mevriz.ru/annotations/2015/4/> (accessed: 10.01.2026).

11. Руденко В.А., Ожерельев В.Д., Евдошкина Ю.А., Цуверкалова О.Ф., Сетраков А.Н. Системный подход к оценке корректирующих мероприятий для формирования культуры безопасности в атомной отрасли. *Глобальная ядерная безопасность*. 2020;3(36):85-94. Режим доступа: <https://doi.org/10.26583/GNS-2020-03-09>

Rudenko V.A., Ozhirelev V.D., Evodshkina Yu.A., Tsverkalkova O.F., Setrakov A.N. A systematic approach to assessing corrective measures for creating a safety culture in the nuclear industry. 2020;3(36):85-94. *Global Nuclear Safety*. (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/GNS-2020-03-09>

12. Горин Н.В. Решение радиационных и экологических вопросов – основы культуры безопасности атомной отрасли. В кн.: Взаимодействие общества, власти и госкорпораций в условиях режима повышенной готовности: доверие, ответственность, солидарность. Монография. Под общей редакцией А.Ю. Шутова, А.Л. Демчука, И.И. Кузнецова. Москва: «КДУ», «Университетская книга», 2020. 102 с. <https://doi.org/10.31453/kdu.ru.91304.0135>

Gorin N.V. Solving radiation and environmental issues: the fundamentals of the nuclear industry's safety culture. In: Interaction between society, authorities, and state corporations in a state of high alert: trust, responsibility and solidarity. Moscow: KDU, University book, 2020. 102 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.31453/kdu.ru.91304.0135>

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Головко М.В.** – концептуализация и разработка общей методологии исследования, формулировка ключевых теоретических положений, общее руководство написанием и редактированием статьи;

#### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Golovko M.V.** – conceptualization and development of a general research methodology, formulation of key theoretical provisions, general management of writing and editing of the article;

**Руденко В.А.** – проведение литературного обзора по теоретическим основаниям, методологическое обоснование, критический анализ результатов;

**Рябышев М.В.** – сбор, систематизация и анализ первичных данных (корпоративных отчетов, стандартов), разработка модели;

**Анцибор А.В.** – предварительная обработка эмпирических данных; обеспечение стилистического единства и формальных требований к статье.

**ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:**

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

**КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:**

Конфликт интересов отсутствует.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:**

**Мария Владимировна Головко**, доктор экономических наук, профессор кафедры институциональной экономики и инвестиционного менеджмента, Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, г. Краснодар, Краснодарский край, Российская Федерация.

<http://orcid.org/0000-0002-4835-9800>

e-mail: [golovko178@mail.ru](mailto:golovko178@mail.ru)

**Валентина Анатольевна Руденко**, доктор социологических наук, заведующий кафедрой экономики и социально-гуманитарных дисциплин, руководитель Волгодонского инженерно-технического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-6698-5469>

WoS Researcher ID: B-7730-2016

e-mail: [VARudenko@mephi.ru](mailto:VARudenko@mephi.ru)

**Михаил Васильевич Рябышев**, доцент кафедры экономики и социально-гуманитарных дисциплин, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0005-7202-4276>

e-mail: [MVRyabyshev@mephi.ru](mailto:MVRyabyshev@mephi.ru)

**Анна Васильевна Анцибор**, кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и социально-гуманитарных дисциплин, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-1192-4554>

e-mail: [AVAntsibor@mephi.ru](mailto:AVAntsibor@mephi.ru)

**Rudenko V.A.** – conducting a literature review on theoretical foundations, methodological justification, critical analysis of the results;

**Ryabyshev M.V.** – collection, systematization, and analysis of primary data (corporate reports, standards), development of a model;

**Antsibor A.V.** – preliminary processing of empirical data; ensuring stylistic unity and formal requirements for the article.

**FUNDING:**

The study had no external funding.

**CONFLICT OF INTEREST:**

No conflict of interest.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:**

**Mariya V. Golovko**, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Department of Institutional Economics and Investment Management, I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Krasnodar krai, Russian Federation.

<http://orcid.org/0000-0002-4835-9800>

e-mail: [golovko178@mail.ru](mailto:golovko178@mail.ru)

**Valentina A. Rudenko**, Dr. Sci. (Soc.), Head of the Department of Economics and Social and Humanitarian Disciplines, Head of Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-6698-5469>

WoS Researcher ID: B-7730-2016

e-mail: [VARudenko@mephi.ru](mailto:VARudenko@mephi.ru)

**Mikhail V. Ryabyshev**, Associate Professor, Department of Economics and Social and Humanitarian Disciplines, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0001-7327-0592>

e-mail: [MVRyabyshev@mephi.ru](mailto:MVRyabyshev@mephi.ru)

**Anna V. Antsibor**, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department of Economics and Social and Humanitarian Disciplines, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-1192-4554>

e-mail: [AVAntsibor@mephi.ru](mailto:AVAntsibor@mephi.ru)

Поступила в редакцию / Received 10.12.2025

После доработки / Revision 27.02.2026

Принята к публикации / Accepted 03.03.2026

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

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-12>

УДК 620.9:330.342.22

EDN NBOPGC

Оригинальная статья / Original paper




Развитие альтернативных источников энергии Африки в контексте  
зеленой повестки и экономического развития региона

Т.С. Попова<sup>1</sup>  , В.В. Беспалько<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация

<sup>2</sup> Институт международных отношений Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация

 [tspopova@mephi.ru](mailto:tspopova@mephi.ru)

**Аннотация.** Цель исследования – оценить потенциал и рассмотреть варианты эффективного использования альтернативных источников энергии в климатических условиях Африки с учетом экологических, экономических и социальных аспектов, способствующих достижению приоритетов зеленой повестки и ускорению экономического развития региона. В статье Африка рассмотрена в качестве комплексного объекта анализа, который охватывает как богатую этнокультурную среду, так и уникальную географию, рельеф, природную и сырьевую экосистему. Особое место в исследовании уделено изучению стремительного развития континентальной экономики в последние несколько десятилетий. Был сделан вывод, что большинство имеющихся исследований фокусируется на биоразнообразии, демографии, антропологии, бывшей колониальной зависимости, истории освоения и заселения «черного» материка. Помимо прочего принципиальное внимание ученых и практиков уделяется большому числу экономических проблем данной части света. В рамках современных научных воззрений континент более не идентифицируется исключительно как гипотетическая прародина всего человечества, теперь он также рассматривается и как суверенный центр силы в глобальном пространстве и как стратегический партнер с огромными природными и минеральными богатствами. Африка располагает всеми видами ресурсов для генерации электроэнергии (включая не только твердое топливо и углеводороды, но и возобновляемые источники), в связи с чем в статье была обоснована актуальность анализа и оценки изменений, происходящих в энергетической сфере континента в ходе его промышленного развития. Приведены доводы о своевременности изучения альтернативных источников энергии в контексте климатических реалий Африки и их интеграции в глобальную зеленую повестку. В качестве основных методов при написании статьи выступили метод экспертных оценок, анализ научной литературы, сравнительный и статистический анализ. Основным результатом исследования выступает вывод о необходимости развития возобновляемых источников энергии в Африке, что обусловлено рядом факторов (стабилизация экономики, стремительный рост населения, урбанизация, климатические изменения).

**Ключевые слова:** энергетические ресурсы, демографический рост, Африка, полезные ископаемые, альтернативные источники энергии, энергетический профиль стран, инвестиции, международное сотрудничество в сфере энергетики

**Для цитирования:** Попова Т.С., Беспалько В.В. Развитие альтернативных источников энергии Африки в контексте зеленой повестки и экономического развития региона. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(1):110–118. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-12>


**For citation:** Popova T.S., Bepalko V.V. Development of alternative energy sources in Africa in the context of the region green agenda and economic development. *Nuclear Safety*. 2026;16(1):110–118. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-12>

## Development of alternative energy sources in Africa in the context of the region green agenda and economic development

Tatiana S. Popova  , Valeria V. Bepalko 

<sup>1</sup> *Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation*

<sup>2</sup> *Institute of International Relations of the National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation*

 [tspopova@mephi.ru](mailto:tspopova@mephi.ru)

**Abstract.** The objective of the study is to assess the potential and consider options for the effective use of alternative energy sources in the climatic conditions of Africa, taking into account the environmental, economic, and social aspects that contribute to achieving the priorities of the green agenda and accelerating the economic development of the region. This article examines Africa as a comprehensive object of analysis that encompasses both its rich ethno-cultural environment and its unique geography, topography, natural, and raw materials ecosystem. The study also focuses on the rapid development of the continental economy over the past few decades. It is concluded that most of the available research focuses on biodiversity, demography, anthropology, former colonial dependence, and the history of exploration and settlement of the "black" continent. In addition, scientists and practitioners pay close attention to a wide range of economic issues in this part of the world. In the context of modern scientific views, the continent is no longer identified solely as the hypothetical ancestral home of all humanity, but is now also viewed as a sovereign center of power in the global arena and as a strategic partner with vast natural and mineral resources. Africa has all kinds of resources for generating electricity (including not only solid fuels and hydrocarbons, but also renewable sources), which is why the article substantiated the relevance of analyzing and evaluating the changes that are taking place in the continent's energy sector during its industrial development. The article also argued for the importance of studying alternative energy sources in the context of Africa's climate realities and their integration into the global green agenda. The main methods used in the article were expert assessments, literature analysis, and comparative and statistical analysis. The main result of the study is the conclusion that it is necessary to develop renewable energy sources in Africa, which is due to a number of factors (economic stabilization, rapid population growth, urbanization, and climate change).

**Keywords:** energy resources, demographic growth, Africa, minerals, alternative energy sources, energy profile of countries, investments, and international cooperation in the field of energy

### Введение

Объектом исследования в настоящей работе выступил африканский континент как комплексный геополитический и экономический регион, обладающий уникальными природно-климатическими условиями, демографическими характеристиками и энергетическим потенциалом.

Предметом исследования был выбран процесс развития альтернативных (возобновляемых) источников энергии в климатических условиях Африки, рассматриваемый в контексте реализации приоритетов зеленой повестки и ускорения социально-экономического развития региона.

Для достижения поставленной в аннотации цели авторами были обозначены и последовательно решены следующие задачи:

1. Проведена оценка современного состояния энергетического сектора Африки, в частности был проведен анализ уровня электрификации, структуры генерирующих

мощностей и выявлены ключевые проблемы, связанные с дефицитом энергии.

2. Осуществлен анализ потенциала альтернативных источников энергии в климатических условиях субрегионов континента: сопоставлены возможности, перспективы и ключевые сложности использования солнечной, ветровой, атомной, геотермальной энергетики, а также био- и гидроэнергетики.

3. Представлено теоретическое обоснование целесообразности перехода энергетической системы Африки к альтернативным источникам энергии как инструменту решения социально-экономических и экологических проблем региона: снижению бедности, улучшению доступа к энергии, повышению энергетического суверенитета, стабилизации экономики и смягчению последствий изменения климата.

Научная новизна исследования заключается в комплексном обосновании необходимости развития возобновляемых источников энергии в Африке как ключевого фактора,

интегрирующего экологические приоритеты зеленой повестки с решением социально-экономических проблем региона.

Сегодняшняя Африка делится на 5 субрегионов: Северная, Западная, Центральная, Восточная и Южная и включает в свой состав 54 независимых государства, признанных ООН. Это важнейший геополитический и экономический игрок новой эпохи. Данная значимость предопределяется следующими ключевыми аспектами:

#### 1. Геополитическая роль Африки.

Между такими сверхдержавами как США, РФ, Китай, страны ЕС, идет длительная борьба за получение доступа к ресурсам Африки и за закрепление на ее рынках. Для современных технологий необходимы редкоземельные ископаемые, в разряд которых входят кобальт, алмазы, уран, медь и пр. Их запасы очень велики в недрах южного континента, что и вызывает интерес у других государств. Помимо этого, западная часть Африки отличается стратегическими запасами нефти, выступая ее альтернативным экспортером на мировом рынке и одновременно являясь достаточно сильным конкурентом Ближнему Востоку. Также, характеризуя геополитическое значение Африки, стоит отметить, что входящие в ее состав страны, стремясь к собственному суверенитету, играют активную роль в постепенном переходе к многополярному миропорядку.

#### 2. Экономическое значение Африки.

Африка – континент с уникальным природным потенциалом, обладающий обширными земельными, лесными и водными ресурсами. Для иностранных инвесторов эта богатейшая территория выступает объектом вложений в горнодобывающую отрасль, пищевую промышленность, агропромышленный комплекс, инфраструктуру и цифровые технологии. Целевая аудитория в Африке стабильно растет в связи с постоянным увеличением численности местного населения, что дает возможность рассматривать территорию в качестве перспективного потребительского рынка.

В то же время Африканский континент сталкивается с комплексом острых проблем:

1. Бедность и неравенство: Миллионы людей живут за чертой бедности, несмотря

на богатые природные ресурсы.

2. Затянувшийся долговой кризис ограничивает развитие Африки.

3. Отсталая транспортная инфраструктура, отсутствие электроэнергии и связи на большей части материка тормозят его экономический рост.

4. Высокая концентрация конфликтов, особенно в центральной части и странах, не имеющих выхода к морю, провоцирует частые вооруженные конфликты и сепаратизм.

5. Население растет быстрее (с 2000 года по 2025 численность выросла в 2 раза с 801 млн. чел. до 1,542 млрд. чел.), чем инфраструктура и экономика успевают адаптироваться под новые демографические условия.

6. Нехватка квалифицированных кадров в купе с частыми эпидемиями приводят к высокой смертности населения.

7. Критическое состояние продовольственной безопасности, вызванное климатическими шоками, низкой производительностью в агропромышленном комплексе, слабой инфраструктурой. Так же остро стоит проблема с пресной водой.

8. Темпы потепления выше среднемировых, что приводит к катастрофическим засухам и наводнениям.

9. Экономическое, политическое и культурное влияние бывших метрополий ведет к сохраняющейся зависимости от внешних стандартов.

Несмотря на перечисленные проблемы, Африка остается важнейшим регионом мира, определяющим уровень развития международных связей и глобальной геополитической стабильности.

### Материалы и методы

В качестве основных методов выступили:

1. Анализ научной литературы (изучение и обобщение исследований на тему существующих проблем и перспектив экономического развития Африки) [1-6].

2. Статистический анализ, необходимый для анализа данных о численности населения Африки, уровне энергопотребления, что помогло выявить тенденции и закономерности, которые могут быть использованы для разработки дальнейших энергостратегий.

3. Сравнительный анализ – сопоставление альтернативных источников энергии в разных климатических зонах континента.

### Обсуждение и результаты

На сегодняшний день Африка является крупнейшим неосвоенным энергетическим рынком мира, в первую очередь в макрорегионе южнее Сахары. Энергетическая экосистема Африки – это быстроразвивающийся, но в то же время фрагментированный рынок с колоссальным потенциалом возобновляемых источников энергии (ВИЭ), и в то же время с огромным дефицитом: более половины населения не имеют доступа к электричеству и к экологически чистым технологиям. Только в Марокко, Алжире, Египте и Тунисе уровень электрификации достигает 100%, в то время как в Чаде, Центральноафриканской Республике и Малави он ниже 5%. Отсутствие доступа к современным источникам энергии серьезно ограничивает потенциал развития континента и, что не менее важно, наносит существенный урон экологии и климату. Хотя Африка постепенно сокращает строительство угольных и газовых электростанций, уголь и газ остаются ключевыми источниками энергии, обеспечивая две трети ее выработки.

На конец 2024 г. установленная электрическая мощность генерирующих источников Африки – 259689 МВт, в том числе: Возобновляемые источники – 66003 МВт, из которых: ТЭС, сжигающие биомассу – 1637 МВт, ТЭС, сжигающие возобновляемые муниципальные отходы – 25 МВт; ГЭС – 36454 МВт; ВЭС – 9426 МВт; СЭС – 17514 МВт, ГеоТЭС – 947 МВт. Невозобновляемые – 193685 МВт, из которых: ТЭС, сжигающие органическое топливо – 188205 МВт; АЭС – 1934 МВт и ГАЭС – 3546 МВт.<sup>1</sup> Как видно из статистики, африканская экономика, как и мировая, все еще зависит от ископаемого топлива, однако растущая озабоченность изменением климата стимулирует переход к ВИЭ, включая

гидроэнергетику, солнечную, ветровую, биоэнергетику, геотермальное тепло и другие. Разрабатываются новые «зеленые» стандарты, ориентированные на декарбонизацию и безопасное накопление энергии, анализируется мировой опыт в сфере альтернативной энергетики.

Африка, как один из континентов с наибольшим потенциалом для реализации таких проектов, может сыграть ключевую роль в международных инициативах по борьбе с изменением климата. Внедрение альтернативных источников энергии, становясь локомотивом экономического роста Африки, способствует созданию рабочих мест, привлечению инвестиций, трансферу инноваций и стимулированию цифровых технологий.

В настоящее время высокая зависимость многих африканских стран от импорта ископаемого топлива делает их уязвимыми перед внешними экономическими шоками и колебаниями цен на энергоносители. Развитие альтернативных источников энергии может значительно снизить эту зависимость, повысить энергетический суверенитет и способствовать диверсификации энергобаланса континента.

Использование ВИЭ имеет и значительные социальные эффекты, включая улучшение доступа к современным энергетическим услугам для отдаленных районов Африки, снижение уровня бедности, повышение качества жизни населения и развитие человеческого капитала. Переход к таким типам энергии способствует снижению углеродного следа и минимизации негативного воздействия на окружающую среду, что особенно актуально для Африки, где экологические проблемы (опустынивание, засухи, вырубка лесов, утрата биоразнообразия и загрязнение), представляют собой серьезные вызовы.

Для развития альтернативной энергетики Африка обладает колоссальными, но в то же время неравномерно распределенными ресурсами. Ниже представлена таблица 1, обобщающая ключевые характеристики, перспективы и сложности по каждому из возможных альтернативных видов энергии.

<sup>1</sup> Энергетика Африки [Электронный ресурс]. Евразийская экономическая комиссия : официальный сайт. – Режим доступа: <https://www.eceasecc.org/energetika-afriki> (дата обращения: 10.03.2026)

**Таблица 1.** Сравнительный анализ альтернативной энергетики в Африке**Table 1.** Comparative analysis of alternative energy in Africa

Тип энергетики	Основные характеристики	Перспективы	Ключевые сложности
Солнечная	Высочайший потенциал инсоляции (>60% лучших ресурсов мира). Бурный рост: +4,5 ГВт в 2025 г. (+54%).	Ключевой источник для решения проблемы доступа к энергии, особенно в связке с системами хранения. Прогноз: до 33 ГВт к 2029 г.	Дефицит финансирования малых проектов (большая часть инвестиций – государственные и институциональные), риски экспортно-ориентированных гигантских проектов.-
Ветровая	Значительный потенциал в прибрежных и пустынных зонах. В некоторых странах Африки (например, ЮАР) активно развивается частный сектор использования энергии ветров	Децентрализованное энергоснабжение промышленности, создание гибридных систем, экспорт «зеленого» водорода (транспортировка экологически чистого топлива, произведенного электролизом воды с использованием возобновляемых источников энергии).	Высокая стоимость подключения к сетям, ограничения пропускной способности сетей, спекулятивный характер многих «водородных» мегапроектов.
Гидроэнергетика	Основа ВИЭ сегодня (3-й по объему источник), но потенциал использован лишь на 10% . Строятся гигантские ГЭС (например, в 2025 г. была построена ГЭС «Возрождение» или GERD – крупнейшая ГЭС в Африке мощностью 5150 МВт).	Обеспечение базовых нагрузок, региональная интеграция энергосистем, экспорт электроэнергии.	Высокая стоимость, зависимость от климата, экологические риски. Трансграничные конфликты из-за водных ресурсов: длительный спор между Египтом, Суданом и Эфиопией из-за строительства Эфиопией «Великой плотины возрождения Эфиопии»
Атомная	Работает только одна АЭС – «Куберг», расположенная недалеко от Кейптауна, имеет два энергоблока общей мощностью 1880 МВт. Совместно с Росатомом строится первая крупная АЭС в Египте («Эль-Дабаа»). Интерес к данному направлению проявляют более 30 стран мира.	Стабильная генерация для промышленности и городов. Особые надежды на малые модульные реакторы (ММР) для слабых сетей.	Требуются огромные инвестиции, налицо неготовность инфраструктуры и сетей, нехватка квалифицированных кадров и регуляторов, дефицит водных ресурсов для охлаждения, политическая нестабильность.
Геотермальная	Значительный потенциал в Восточно-Африканской рифтовой зоне (Кения, Эфиопия).	Стабильный, независимый от погоды источник базовой нагрузки для энергодефицитных стран региона.	Высокая стоимость разведки и бурения, технологическая сложность, привязанность к конкретным геологическим зонам.
Биоэнергетика	Активно развиваются проекты по использованию сельскохозяйственных отходов (производство масел, сахарная промышленность, какао-бобы, сорго, скорлупа кешью).	Децентрализованное производство энергии, замена древесного угля, создание рабочих мест в сельской местности, развитие циркулярной экономики.	Неразвитая логистика сбора сырья, недостаток инвестиций в современные технологии (биопереработка), конкуренция с традиционным использованием отходов.

Развитие альтернативной энергетики в Африке – это сложная задача, требующая кооперации на многих уровнях. В таблице 2 представлена структурированная характеристика институциональных, инфраструктур-

ных и финансово-экономических механизмов стимулирования развития альтернативных источников энергии, реализуемых при поддержке межправительственных организаций и стран-партнеров.

**Таблица 2.** Механизмы развития ВИЭ в Африке**Table 2.** Mechanisms of renewable energy development in Africa

Категория	Инструмент	Примеры реализации / Организации	Краткая характеристика и роль в развитии ВИЭ
Институциональные	Национальные агентства и министерства по ВИЭ	– ЮАР: Департамент минеральных ресурсов и энергетики (DMRE). – Египет: NREA (New and Renewable Energy Authority). – Кения: Министерство энергетики и нефти.	Создание специализированных государственных органов, отвечающих за политику, лицензирование и планирование в сфере «зеленой» энергетики.
	Региональные энергетические пулы	– SAPP (Южноафриканский пул). – WAPP (Западноафриканский пул). – EAPP (Восточноафриканский пул).	Обеспечивают интеграцию ВИЭ в общую энергетическую экосистему Африки, регулируют трансграничную торговлю энергией и стандартизируют правила.
	Независимые регуляторы (REC)	Национальные энергетические регуляторы (например, ERC в Кении, NERSA в ЮАР).	Устанавливают тарифы, выдают лицензии производителям и следят за исполнением обязательств по покупке энергии у «зеленых» генераторов.
	Законодательные рамки	Законы о чистой энергии (Кения, Уганда, ЮАР).	Легализуют право частных лиц и бизнеса устанавливать солнечные панели и продавать излишки в сеть.
Инфраструктурные	Строительство «зеленых» коридоров	– Проект «Desert to Power» (Сахель). – Линии электропередач для ГЭС (Эфиопия-Кения).	Строительство высоковольтных ЛЭП специально для транспортировки энергии от крупных солнечных, ветряных или гидростанций, расположенных в удаленных районах, к центрам энергопотребления.
	Микро- и мини-сети	Проекты в Нигерии, Танзании, ДР Конго (при поддержке Всемирного банка и AfDB).	Децентрализованные гибридные станции (солнце+дизель/накопители) для электроснабжения удаленных деревень, где нет доступа к основной сети.
	Развитие систем накопления энергии	Гидроаккумулирующие станции (ЮАР), проекты Battery Storage (Марокко, ЮАР).	Решение проблемы прерывистости ВИЭ (солнце/ветер). Накопители позволяют стабилизировать сеть и сдвигать пики генерации.
	Создание кластеров и особых экономических зон	Промышленные зоны с дешевой «зеленой» энергией (например, в Марокко вокруг NOOR Ouarzazate).	Привлечение энергоемких производств за счет строительства рядом крупных станций (ВИЭ) и подведения к ним необходимой инфраструктуры.
Финансово-экономические	Программы «Зеленых» аукционов	Renewable Energy IPP Procurement Programme – программа закупок электроэнергии независимыми производителями возобновляемой энергии – инициатива правительства ЮАР, направленная на увеличение мощности электроэнергетики за счет инвестиций частного сектора в солнечную фотоэлектрическую и концентрированную солнечную энергетику, наземную ветроэнергетику, малые гидроэлектростанции (<40 МВт), свалочный газ, биомассу и биогаз.	Государство проводит тендеры, где частные компании конкурируют за право построить электростанцию. Побеждает предложивший самую низкую цену за кВт·ч. Обеспечивает прозрачность и снижение стоимости энергии.
	Фиксированные «зеленые» тарифы	Использовались на ранних этапах в Кении, Уганде, Алжире.	Государство гарантирует покупку всей произведенной энергии по фиксированной повышенной цене на долгий срок. Снижает риски для инвесторов.
	Гранты и льготное финансирование (доноры)	Фонд «Energy for Africa» (AfDB) – многосторонний целевой фонд под управлением Африканского банка развития,	Покрытие первоначальных затрат на проектирование, предоставление дешевых кредитов или гарантий для сниже-

Продолжение таблицы 2

Table 2 continued

Категория	Инструмент	Примеры реализации / Организации	Краткая характеристика и роль в развитии ВИЭ
Финансово-экономические		направленный на развитие возобновляемой энергетики и энергоэффективности. Программы USAID Power Africa – масштабная инициатива правительства США, запущенная в 2013 г., направленная на развитие энергетического сектора в странах Африки к югу от Сахары. GET.invest – европейская программа, мобилизующая инвестиции в проекты чистой энергетики в развивающихся странах и странах с переходной экономикой	Снижение рисков частных инвесторов.
	«Зеленые» облигации и климатические фонды	Выпуск облигаций банками (Nedbank в ЮАР), фонды Green Climate Fund (GCF) – крупнейший международный фонд, созданный под эгидой РККИ ООН для поддержки развивающихся стран в борьбе с изменением климата	Привлечение долгосрочного капитала на международных рынках специально под проекты устойчивого развития и ВИЭ.
	Налоговые льготы и пошлины	Отмена НДС и импортных пошлин на солнечные панели и инверторы (Замбия, Зимбабве, Кения).	Снижение стоимости оборудования для конечных потребителей и девелоперов, стимулирование спроса на рынке.
	Результативное финансирование	Проекты в Сенегале, Танзании, Мозамбике.	Компании получают выплаты не за установку оборудования, а за подтвержденный результат (например, за каждого реально подключенного к солнечной системе клиента).

Сейчас Африка переживает экономическую и социальную турбулентность. Динамика ВВП неустойчива, на нее влияют как внутренние проблемы, так и внешние факторы. Цены на энергоносители и сырьевые товары, а также климатические изменения, негативно сказывающиеся на сельском хозяйстве, рыболовстве и туризме, являются ключевыми факторами, влияющими на экономику континента. Традиционная энергетика может стать препятствием для экономического роста, тогда как ВИЭ будут способствовать его стабилизации. Учитывая перебои с электроснабжением и планы по закрытию угольных электростанций, ВИЭ становятся все более актуальными, так как спрос на энергию в Африке растет, в том числе из-за демографического роста и урбанизации. Исследование развития ВИЭ в климатических условиях Африки является актуальным как с точки зрения экологических, так и экономических аспектов, и наиболее приемлемым вариантом трансформации энергетики континента является

Интеграционный сценарий с использованием потенциала стран БРИКС, ЕАЭС.

### Заключение

В заключении можно сформулировать следующие положения, подтверждающие и аргументирующие заявленную в начале работы научную новизну исследования:

1. Был проведен комплексный междисциплинарный подход к анализу Африки не просто как совокупности стран с экономическими проблемами, а как целостного геополитического и экономического феномена. Авторы синтезируют экологические, климатические, демографические, социальные и экономические аспекты (включая влияние внешних игроков, таких как БРИКС и ЕАЭС) для обоснования необходимости зеленого энергетического перехода, что выходит за рамки узкоотраслевого анализа энергетики.

2. Осуществлена актуализация роли альтернативных источников энергии как фактора макроэкономической стабилизации: В статье обоснован вывод о том, что в спе-

цифических условиях Африки развитие ВИЭ выступает не только инструментом «зеленой повестки», но и критически важным фактором стабилизации экономики, снижения уязвимости от внешних шоков (колебания цен на сырье) и обеспечения энергетического суверенитета региона.

3. Выявлены противоречия между потенциальным и реальным доступом к энергии внутри континента: Научная новизна и прикладная значимость прослеживаются в сопоставлении колоссального природно-ресурсного потенциала Африки (включая возобновляемые источники энергии) с критически низким уровнем энергопотребления и доступа к электричеству в большинстве стран материка. Это позволило авторам квалифицировать континент как «крупнейший неосвоенный энергетический рынок», требующий нестандартных (интеграционных) решений и международной помощи.

4. Обоснован интеграционный сценарий развития ВИЭ: Предложенный в статье вывод о необходимости перехода к энергетической трансформации по «Интеграционному сценарию с использованием потенциала стран БРИКС, ЕАЭС» представляет собой элемент научной новизны, поскольку предлагает конкретный вектор международного сотрудничества, учитывающий текущую геополитическую реальность и стремление Африки к суверенитету.

Современный подход к стимулированию развития альтернативных источников энер-

гии в Африке в рамках международного сотрудничества вышел за рамки простого строительства электростанций. Ключевым трендом является создание комплексной экосистемы, где институциональная гармонизация снижает юридические барьеры, инфраструктурные проекты (включая цифровые) обеспечивают возможность торговли энергией, а инновационные финансовые инструменты точно устраняют конкретные риски – от валютных до ценовых. Это позволяет привлекать масштабные частные инвестиции, необходимые для энергетического перехода на континенте.

Сегодня глобальный мир приступил к четвертому энергетическому переходу, который актуален и для африканского континента. С учетом прироста населения и роста экономики африканского континента потребность в энергии будет ежегодно возрастать, что актуализирует разработку и реализацию эффективных мер генерации энергии для удовлетворения потребностей местных жителей и промышленности в энергии. В заключение можно сказать, что Африка становится эпицентром нового энергетического бума. Здесь стремительно развиваются как традиционные ископаемые, так и возобновляемые источники энергии. Однако на пути к устойчивому развитию остаются вызовы, включая неравный доступ к энергии и необходимость в значительном финансировании, в том числе внешнем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Шкваря Л. В., Абдулай М. С.Ю. Возобновляемые источники энергии: опыт стран Африки. *Азия и Африка сегодня*. 2025;3:40–47. Режим доступа: <https://asafras.ru/s27822389s0321507525030056-1/> (дата обращения: 02.02.2026).

Shkvarya L.V. Abdoulaye M.S.Yu, Renewable energy sources: the experience of African countries. *Asia and Africa today*. 2025;3:40–47. (In Russ.). Available at: <https://asafras.ru/s27822389s0321507525030056-1/> (accessed: 02.02.2026).

2. Давыденко Е. В. Современное состояние, проблемы и перспективы торгово-экономических отношений России и государств Африки. *Финансовый бизнес*. 2023,8(242):256–257. EDN ITWBGZ. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54363358> (дата обращения: 02.02.2026).

Davydenko E.V. Current state, problems and prospects of trade and economic relations between Russia and African states. *Financial Business*. 2023,8(242):256–257. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54363358> (accessed: 02.02.2026).

3. Шарова А. Ю. Электроэнергетика Африки: современное состояние, проблемы и перспективы развития. *Международная торговля и торговая политика*. 2025;11;4(44):101–116. <https://doi.org/10.21686/2410-7395-2025-4-101-116>

Sharova A.Yu. Electricity sector in Africa: current state, problems and prospects. *International Trade and Trade Policy*. 2025;11(4):101-116. (In Russ.). <https://doi.org/10.21686/2410-7395-2025-4-101-116>

4. Саенко А.Н. Перспективное развитие экономических показателей стран Африки: направления и пути решения проблем. *Сегодня и завтра Российской экономики*. 2024;3(26-36). Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=69186407> (дата обращения: 02.02.2026).

Saenko A.N. Prospective development of economic indicators of African countries: directions and ways to solving problems. *Today and Tomorrow of the Russian Economy*. 2024;3(26-36). (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=69186407> (accessed: 02.02.2026)

5. Дорофеева В.В. Инновационное развитие стран Африки в контексте сотрудничества с Россией. *Балтийский экономический журнал*. 2024;(3(47)):135-151. Режим доступа: <https://economic.journal.klgtu.ru/jour/article/view/68?ysclid=mmk9b03elv990102333> (дата обращения: 02.02.2026).

Dorofeeva V.V. Innovative development of African countries in the context of cooperation with Russia. *Baltic Economic Journal*. 2024;(3(47)):135-151. (In Russ.). <https://doi.org/10.46845/2073-3364-2024-0-3-135-151>

6. Волков С.Н. Дейч Т.Л. Развитие Африки: планы и участие внешних акторов. *Азия и Африка сегодня*. 2025;8:67-70. Режим доступа: <https://asafras.ru/s27822389s0321507525080088-1/> (дата обращения: 02.02.2026).

Volkov S., Deych T.L. Africa's development: plans and the involvement of external actors. *Asia and Africa Today*. 2025;8:67-70. Available at: <https://asafras.ru/s27822389s0321507525080088-1/> (accessed: 02.02.2026).

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Попова Т.С.** – концепция и качественная разработка исследования, написание текста статьи;

**Беспалько В.В.** – изучение теоретических источников по исследуемой проблематике.

#### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Popova T.S.** – the concept and qualitative development of the study, writing the text of the article;

**Bespalko V.V.** – study of theoretical sources on the issues under study.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

#### FUNDING:

The study has no external funding.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

#### CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Татьяна Сергеевна Попова**, кандидат экономических наук, доцент, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-0554-2672>

e-mail: TSPopova@mephi.ru

**Валерия Витальевна Беспалько**, магистр, Институт международных отношений Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0009-1152-6570>

e-mail: lera190200@gmail.com

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Tatyana S. Popova**, Cand. Sci. (Ecom.), Associate Professor, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-0554-2672>

e-mail: TSPopova@mephi.ru

**Valeria V. Bespalko**, Master, Institute of International Relations of the National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0009-1152-6570>

e-mail: lera190200@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 10.12.2025

После доработки / Revision 11.03.2026

Принята к публикации / Accepted 12.03.2026

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Васяткин А.Г.	5
Алтунина Е.Ю.	15
Анцибор А.В.	99
Белин А.В.	5
Беспалько В.В.	110
Бузоверя М.Э.	44
Головко М.В.	99
Давлетбаев В.П.	78
Дембицкий А.Е.	15
Дмитриева А.П.	44
Жидков М.Е.	34
Идрисов Т.Ш.	90
Камнев М.А.	5
Каргашов А.Г.	34
Копейкин А.Э.	23
Коптелов М.В.	90
Кузнецов М.Г.	23
Кузьмин А.В.	78
Лапкис А.А.	61
Ленских А.Н.	15
Макарова О.А.	78
Меженский П.А.	34
Мозговой А.А.	52
Молодцов А.А.	5
Никитась Г.Н.	61
Озерный Д.А.	61
Плюто Д.И.	78
Поваров В.П.	69
Поволоцкая А.А.	15
Подоляк О.В.	52
Попова Т.С.	110
Руденко В.А.	99
Рябьшев М.В.	99
Самодееenko А.А.	69
Соснин М.А.	5
Томилиn С.А.	34
Усачев Д.Е.	69
Шило С.В.	78

## AUTHOR INDEX

Altunina E.Yu.	15
Antsbior A.V.	99
Belin A.V.	5
Bespalko V.V.	110
Buzoverya M.E.	44
Dauletbayeu V.P.	78
Dembitsky A.E.	15
Dmitrieva A.P.	44
Golovko M.V.	99
Idrisov T.Sh.	90
Kamnev M.A.	5
Kartashov A.G.	34
Kopeikin A.E.	23
Koptelov M.V.	90
Kuzmin A.V.	78
Kuznetsov M.G.	23
Lapkis A.A.	61
Lenskih A.N.	15
Makarava V.A.	78
Mezhensky P.A.	34
Molodtsov A.A.	5
Mozgovoi A.A.	52
Nikitas G.N.	61
Ozerny D.A.	61
Pliuta D.I.	78
Podolyak O.V.	52
Popova T.S.	110
Povarov V.P.	69
Povolotskaya A.A.	15
Rudenko V.A.	99
Ryabyshev M.V.	99
Samodeenko A.A.	69
Shyla S.V.	78
Sosnin M.A.	5
Tomilin S.A.	34
Usachev D.E.	69
Vasyatkin A.G.	5
Zhidkov M.E.	34

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Полный текст статьи для опубликования должен быть оригинальным – не более 20% заимствований, сопровождаться экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати, соответствовать приведенным ниже правилам оформления.

В одном файле помещается одна статья, частями которой являются:

- название на русском и английском языках;
- инициалы и фамилия авторов на русском и английском языках;
- аффилиация каждого автора на русском и английском языках;
- структурированная по IMRAD аннотация (200-270 слов) на русском и английском языках;
- ключевые слова (не менее 10-и речевых единиц) на русском и английском языках;
- текст статьи;
- объединенный Список литературы / References (см. пример оформления);
- вклад в представленную научную работу каждого автора;
- сведения об авторах (для каждого автора – Фамилия Имя Отчество, место/а работы, должность/и, ученая степень, звание, электронный адрес, индекс ORCID (<http://orcid.org>), телефон контактного автора) на русском и английском языках.

Статья должна быть структурирована: введение (актуальность темы; обзор проблемы; цель работы); методология (теория вопроса; подробное изложение методики проведения опытов; описание материалов и методов анализа; статистическая обработка); результаты и их обсуждение; заключение (выводы). Цель и ключевые результаты работы должны быть понятно представлены в аннотации и тексте статьи, научная новизна работы обоснована во введении со ссылкой на источники, опубликованные в научных рецензируемых изданиях (в том числе зарубежных) последних нескольких лет. Для статей производственного характера достаточно описать цель работы и полученные результаты.

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 непосредственно перед самими формулами.

Включение таблиц в статью должно быть целесообразным, сопровождаться нумерацией, заголовками на русском и английском языках (10 пт) и ссылками в тексте непосредственно перед самими таблицами.

Рисунки должны быть четкими, с нумерацией, подписями на русском и английском языках (10 пт), иметь ссылки в тексте и сопровождаться обоснованиями и выводами.

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 см. Желательный объем статьи – не более 15 страниц машинописного текста, включая таблицы и рисунки (не более 10-и), список литературы (количество источников определяется автором исходя из поставленной научно-исследовательской цели). Если в тексте менее 2700 знаков, статья может быть отклонена экспертами.

С целью повышения качества и объективности публикаций авторы призваны отражать в статьях передовой научный опыт России, стран СНГ и дальнего зарубежья по рассматриваемой проблематике. Объединенный список литературы / References приводится в конце статьи в порядке упоминания в тексте и оформляется в стиле Vancouver, но без сокращения названий журналов. Ссылки на иностранные источники даются на языке оригинала. Не включаются в список литературы источники, которые никогда не будут проиндексированы в базах данных цитирования: ГОСТы, нормативные и законодательные акты, внутренние документы предприятий (доклады, отчеты, протоколы и т.д.), официальные сайты организаций, словари, справочники, учебники и т.д. Такие источники цитируются непосредственно в тексте или в постраничных сносках согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008 <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=193511> с указанием выходных данных и режима доступа, по которым их можно найти в Интернете. Доклады конференций могут быть включены в список литературы, если они доступны в Интернете, при этом указывается режим доступа и дата обращения.

Для соблюдения правил слепого рецензирования необходимо создать копию файла со статьей, удалить персональные данные, содержащиеся в тексте файла и его свойствах (в тексте статьи удалить имена авторов и наименования их мест работы, ссылки на работы авторов в списке литературы заменить на «Автор, год», информацию об авторах следует удалить из свойств документа), сохранить в формате pdf с названием «На рецензирование\_Название/начало названия статьи...».

Для принятия статьи в номер журнала необходимо загрузить файл со статьей в формате Word на платформе elpub – <https://glonucsec.elpub.ru> – и предоставить следующие материалы по электронной почте [oni-viti@mephi.ru](mailto:oni-viti@mephi.ru) :

- согласие на обработку персональных данных;
  - файл со статьей в формате Word;
  - итоговый (после доработки) файл в формате pdf с подписью авторов;
  - файл с обезличенной статьей в формате pdf для слепого рецензирования;
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати.

## ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Губеладзе О.А., Губеладзе А.Р. Оценка технического состояния малогабаритной ядерной энергетической установки после опрокидывания транспортного агрегата. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(4):19–26. EDN: GIAKOU. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-02>

Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. Technical condition assessment of a small-sized nuclear power plant after transportation unit overturning. *Global nuclear safety*. 2024;14(4):19–26. (In Russ.). EDN: GIAKOU <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-02>

2. Поваров В.П., Росновский С.В., Мельников Э.С., Литовченко М.Н. и др. Исследование воздействия физико-химических факторов при коррекционной обработке дебалансных вод АЭС с целью обеспечения соответствия кондиционированных радиоактивных отходов нормативным требованиям. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(4):5–18. EDN: FNSFJI. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-01>

Povarov V.P., Rosnovskiy S.V., Melnikov E.S., Litovchenko M.N. et al. Investigation of the impact of the physical and chemical factors during correction treatment of NPP unbalance water to ensure compliance of conditioned radioactive waste with regulatory requirements. *Global nuclear safety*. 2024;14(4):5–18. (In Russ.). EDN: FNSFJI. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-01>

3. Припачкин Д. Физико-химические основы аэрозольной безопасности на предприятиях ядерного топливного цикла. Автореферат диссертации ... доктора физико-математических наук (1.4.4 – Физическая химия). Москва: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2024. 48 с. Режим доступа: <https://openrepository.mephi.ru/entities/publication/266af205-29ad-4d12-b7ab-e94c9f2916e1> (дата обращения: 20.03.2025).

Pripachkin D. Physico-chemical bases of aerosol safety at nuclear fuel cycle enterprises. Abstract of dissertation ... Doctor of physical and mathematical sciences (1.4.4 - Physical chemistry). Moscow: Institute for Problems of Safe Development of Nuclear Power Engineering RAS, 2024. 48 с. Available at: <https://openrepository.mephi.ru/entities/publication/266af205-29ad-4d12-b7ab-e94c9f2916e1> (accessed: 20.03.2025).

4. Северцев Н.А., Юрков Н.К. Безопасность динамических систем на этапах жизненного цикла. Монография. Пенза: Изд-во ПГУ, 2023. 568 с. Режим доступа: <https://elibr.pnzgu.ru/library/1699606807> (дата обращения: 20.03.2025).

Severtsev N.A., Yurkov N.K. Safety of dynamic systems at the stages of life cycle. Monograph. Penza: Publishing house of Penza State University, 2023. 568 p. (In Russ.). Available at: <https://elibr.pnzgu.ru/library/1699606807> (accessed: 20.03.2025).

5. Файков Д.Ю., Байдаров Д.Ю. Диверсификация в атомной отрасли: современное состояние, особенности, перспективы. *Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России*. 2021;2:41–48. Режим доступа: (дата обращения: 20.03.2025).

Faykov D.Yu., Baidarov D.Yu. Diversification in the nuclear industry: current state, features, prospects. *Scientific bulletin of the military-industrial complex of Russia*. 2021;2:41–48. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46289137> (accessed: 20.03.2025).

6. Бойкова Т.В., Кочнов Ю.О., Мясников С.В., Петрунин Н.В., Терашкевич С.С. Эксплуатационный контроль состояния металла корпусов растворных реакторов в НИЦ «Курчатовский институт». *Вопросы материаловедения*. 2022;(4(112)):191–198. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2022-112-4-191-198>

Boikova T.V., Kochnov Y.O., Myasnikov S.V., Petrunin N.V., Terashkevich S.S. Operational monitoring of the metal of solution pressure vessel reactors at NRC «Kurchatov institute». *Voprosy materialovedeniya*. 2022;4(112):191–198. (In Russ.). <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2022-112-4-191-198>

7. Камышев А.В., Пасманик Л.А., Ровинский В.Д., Гетман А.Ф., Губа С.В. Способ определения остаточных напряжений в металле шва сварных соединений трубопроводов (варианты). Патент RU 2711082 C1 Российская Федерация, МПК G01N 29/07 (2006.01). № 2019110165/28. Заявлен: 05.04.2019. Опубликовано: 15.01.2020. 6 с. Режим доступа: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2711082C1\\_20200115](https://yandex.ru/patents/doc/RU2711082C1_20200115) (дата обращения 20.03.2025).

Kamyshev A.V. Pasmanik L.A., Rovinskij V.D., Getman A.F., Guba S.V. Method for determination of residual stresses in weld metal welded joints of pipelines (versions). Patent Russia RU 2711082 C1: 15.01.2020. (In Russ.) Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2711082C1\\_20200115](https://yandex.ru/patents/doc/RU2711082C1_20200115) (accessed: 20.03.2025).

8. Appleton J.D., Kendall G.M. Gamma-radiation levels outdoors in Great Britain based on K, Th and U geochemical data. *Journal of environmental radioactivity*. 2022;271–272:106948. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106948>

Электронный адрес редакции журнала «Глобальная ядерная безопасность» – [oni-viti@mephi.ru](mailto:oni-viti@mephi.ru)  
Выпускающий редактор – Лобковская Надежда Ивановна, +79281883628, [NILobkovskaya@mephi.ru](mailto:NILobkovskaya@mephi.ru)

## NOTES FOR AUTHORS

(!) Please, pay attention: the article formatting requirements have been updated in order to expand the international readership of the journal since

The full text of the article to be published must be original – no more than 20% borrowings, it must be accompanied by an expert resolution on publication possibility in the open press, and it must comply with the following rules.

One file consists of one paper which has the following:

- the title in Russian and English;
- authors' initials and surnames in Russian and English;
- an affiliation in Russian and English for each author;
- the structured abstract (200-270 words) in Russian and English according to IMRAD;
- keywords in Russian and English (not less than 10 speech units);
- article text;
- Combined List of References / References (see example design);
  - contribution to the presented scientific work of each author;
- information about the authors in Russian and English (each author should provide a full name, a place of work, position/s, an academic degree, a rank, e-mail address, ORCID index (<http://orcid.org>), contact phone number).

The article should be structured: introduction (relevance of the topic; review of the problem; purpose of the work); methodology (issue theory; detailed description of experiment methodology; description of materials and methods of analysis; statistical processing); results and their discussion; conclusions. The objective and key results of the work should be clearly presented in the abstract and the text of the article, the scientific novelty of the work is justified in the introduction with reference to the sources published in scientific peer-reviewed publications (including foreign ones) in the last few years. It is enough to describe the objective of the work and the results obtained for articles of a production nature.

The Equation 3.0 editor is recommended when writing 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 just ahead of the formulas.

Inclusion of tables in the article should be appropriate, they should be numbered and have headings in Russian and English (10 pf) and links in the text just ahead of the tables.

Figures should be clear, numbered, figure captions in Russian and English (10 pf), have links in the text and be accompanied by justifications and conclusions.

An article should be processed in the Microsoft Office 97-2003 Word 7.0 format, 12 point font Times New Roman; print – 1 interval. Without any signs of forced transfer and additional gaps. Page parameters: all sides are 2,5 cm. The volume of article is no more than 15 pages of the typewritten text, including tables, drawings (no more than 10) and the list of references (the number of sources is determined by the author on the basis of the research objective). If the text of the article is less than 2700 type characters, the article may be rejected by experts.

In order to improve the quality and objectivity of publications, the authors are intended to reflect the advanced scientific experience of Russia, the CIS and foreign countries on the subject matter in the articles. The combined List of References is given at the end of the article in the order of mention in the text, in Vancouver style, but without abbreviating the names of the journals. References to foreign sources should be given in their original language.

Sources that will never be indexed in citation databases are not included in the reference list: State Standards, normative and legislative acts, internal documents of companies (reports, protocols, etc.), official websites of organisations, dictionaries, reference books, textbooks, etc. Such sources are cited directly in the text or in page footnotes according to State Standard R 7.0.5-2008 <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=193511> with indication of output data and URL where they can be found on the Internet. Conference papers may be included in the list of references if they are available on the Internet, indicating the URL and the date of reference.

To comply with the rules of blind peer review, a copy of the file with the article should be created, personal data contained in the text of the file and its properties should be deleted (authors' names and the names of their places of work in the text of the article should be deleted, references to authors' works in the list of references should be replaced by «Author, year», information about authors should be removed from the document properties), saved in pdf format with the title «To review\_Title/start title of article...».

To be accepted into the journal issue, the article must be uploaded as a Word file on the elpub platform – <https://glonucsec.elpub.ru> – and the following materials must be sent by email [oni-viti@mephi.ru](mailto:oni-viti@mephi.ru):

- consent to personal data processing;
- an article file in Word format;
- final (after revision) pdf file signed by the authors;
- a pdf file of the article for blind peer review;
- an expert analysis of publication possibility in the open press.

## THE LIST OF REFERENCES STANDARD

1. Balyabin A.I., Gerasimov S.I., Ladin D.A., Maskaykin S.A. et al. Study of mathematical models of elastoplastic materials. *Global nuclear safety*. 2024;14(4):42–54. (In Russ.). EDN: ROFQTO. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-05>
2. Morgunova G.V., Khokhlov A.N. Place of Russian scientific journals on natural, exact, and technical sciences in the international rankings. *Science editor and publisher*. 2024;9(2):209–220. (In Russ.). <https://doi.org/10.24069/SEP-24-26>
3. Stevens M.R., Park K., Tian G. et al. Why do some articles in planning journals get cited more than others? *Journal of planning education and research*. 2022;42(3):442–463. <https://doi.org/10.1197/0739456X19827083>
4. Nikitin A.A., Rogozhkin S.V., Ogorodnikova O.V., Bogachev A.A. et al. Microstructure and mechanical properties of w-10cr-0.5y alloy under heavy ion irradiation. *Nuclear physics and engineering*. 2025;16(2):135–145. (In Russ.). EDN: QWXNZS. <https://doi.org/10.56304/S2079562924050336>
5. Polyaniin A.D., Kudryashov N.A. Nonlinear schrödinger equation of general form: multifunctional model, reductions and exact solutions. *Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI»*. 2025;14(1):24–36. (In Russ.). EDN: DXKPEC. <https://doi.org/10.26583/vestnik.2025.1.3>
6. Rashitov P.A., Seregin D.A., Anikin M.D., Vershanskiy E.A. Application of multilevel voltage inverters in distributed series compensation devices. *Bulletin MPEI*. 2021;3:58–66. (In Russ.). <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2021-3-58-66>
7. Surin V.I., Beketov V.G., Abu Ghazal A.A., Alwaheba A.I. Spectral analysis method of electrophysical non-destructive testing data. *Journal of Physics: Conference series. Mathematical modeling and computational methods in problems of electromagnetism, electronics and physics of welding*. 2021;(2131):052061. (In Russ.). <https://doi.org/10.1088/1942-6596/2131/5/052061>
8. Erd A., Stokłosa J. Main design guidelines for battery management systems for traction purposes. Proceedings of the XI International scientific and technical conference automotive safety. 2018. Slovakia. <https://doi.org/10.1109/AUTOSAFE.2018.8373345>
9. Lapkis A.A., Tsykhler L.V., Nikiforov V.N., Egorova V.P. Analysis of calibration error of NPP shut-off valve electric drive. *Global nuclear safety*. 2024;14(4):80-90. (In Russ.). EDN: TGXPIS. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-08>
10. Golyandina N., Zhigljavsky A. Singular spectrum analysis for time series. SpringerBriefs in Statistics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin. Heidelberg, 2020. ISBN 978-3-662-62435-7. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-62436-4> (accessed: 20.03.2025).
11. Kovalev N.V., Prokoshin A.M., Davydova P.V., Korolev V.A. Radiation characteristics of reactor grade platinum group metals. *Nuclear energy and technology*. 11(1):55–58. Available at: <https://nucet.pensoft.net/article/150529/list/18/> (accessed: 20.03.2025).
12. Surin V.I., Ivanyi M.V., Shcherbakov A.A., Shcherban A.A., Pavlichenko A.V., Tomilin S.A., Zhidkov M.E., Gook A.E. Gradient method of structural heterogeneity identification in electrical inspection of equipment, products and materials. *Global nuclear safety*. 2024;14(4):34–41. (In Russ.). EDN: QWREXO. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-04>
13. Arkadov G.V., Slepov M.T. Neutron noise control techniques for VVER core. *Nuclear safety*. 2024;14(4):55–70. (In Russ.). EDN: SAGHCF. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-06>

*Nuclear Safety* – [oni-viti@mephi.ru](mailto:oni-viti@mephi.ru)

Executive Editor – Nadezhda I. Lobkovskaya, +79281883628, [NILobkovskaya@mephi.ru](mailto:NILobkovskaya@mephi.ru)