

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

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-01>

УДК [621.039.577+623.828.8]:341.29

EDN AGGJEL

Оригинальная статья / Original paper



Использование оборудования мер сохранения и наблюдения МАГАТЭ на борту атомных плавучих энергоблоков российского дизайна

А.В. Просянов, М.П. Лац, С.М. Брыкалов , Н.А. Сальникова , А.Е. Лазарев,

В.В. Мальев , Т.А. Тагирова , А.С. Чижов

Госкорпорация «Росатом», г. Москва, Российская Федерация

АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

chijov_as@okbm.nnov.ru

Аннотация. В настоящее время осуществляется разработка инновационного экспортноориентированного проекта атомного плавучего энергоблока, в том числе с точки зрения применения гарантий МАГАТЭ с учетом опыта эксплуатации на наземных атомных станциях с водо-водяными реакторами. Принимая во внимание технические особенности проекта атомного плавучего энергоблока и обращение с ядерным материалом, требуется адаптация существующих подходов по применению гарантий МАГАТЭ к этому судну. Ключевым аспектом предотвращения необнаруженного доступа к ядерному материалу является использование оборудования мер сохранения и наблюдения. Соответственно целью статьи является проработка возможного подхода по применению гарантий МАГАТЭ к атомному плавучему энергоблоку с точки зрения установки оборудования мер сохранения и наблюдения. При разработке подхода к применению гарантий МАГАТЭ учитываются жизненный цикл атомного плавучего энергоблока, особенности обращения с ядерным материалом, возможность мобильности объекта. Для достижения высокого уровня проработки подхода в части аспектов применения гарантий используется метод сравнения с аналогичными подходами для наземных атомных станций большой мощности. Рассмотрены особенности обращения с ядерным материалом на атомном плавучем энергоблоке, направленные на минимизацию рисков распространения ядерных материалов. Сформирован перечень оборудования мер сохранения и наблюдения МАГАТЭ, которое может быть использовано на борту атомного плавучего энергоблока с учетом особенностей его эксплуатации. По результатам анализа можно заключить, что схема использования оборудования мер сохранения и наблюдения МАГАТЭ на борту атомного плавучего энергоблока значительно проще, чем на наземных атомных станциях большой мощности. Эта схема может быть своевременно учтена уже на этапе технического проектирования, что упростит установку и использование оборудования мер сохранения и наблюдения МАГАТЭ.

Ключевые слова: ПЭБ, МАГАТЭ, обращение с ядерным материалом, АЭС, нераспространение, сохранение и наблюдение, гарантии.

Для цитирования: Просянов А.В., Лац М.П., Брыкалов С.М., Сальникова Н.А., Лазарев А.Е., Мальев В.В., Тагирова Т.А., Чижов А.С. Использование оборудования мер сохранения и наблюдения МАГАТЭ на борту атомных плавучих энергоблоков российского дизайна. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(4):5–18. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-01>

For citation: Prosyannov A.V., Lats M.P., Brykalov S.M., Salnikova N.A., Lazarev A.E., Malev V.V., Tagirova T.A., Chizhov A.S. Use of the IAEA containment and surveillance measures equipment at Russian-design nuclear floating power units. *Nuclear Safety*. 2025;15(4):5–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-01>

Use of the IAEA containment and surveillance measures equipment at Russian-design nuclear floating power units

Alexey V. Prosyannov, Maksim P. Lats, Sergey M. Brykalov , Nadezhda A. Salnikova , Alexander E. Lazarev, Vladimir V. Malev , Tatyana A. Tagirova , Andrey S. Chizhov

Rosatom State Corporation, Moscow, Russian Federation

Afrikantov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, Russian Federation

chijov_as@okbm.nnov.ru

Abstract. Currently, an innovative export-oriented project of a nuclear floating power unit is being developed including from the point of view of the application of IAEA safeguards taking into account the experience of operation at land-based nuclear power plants with water-cooled reactors. According to the design technical features of a nuclear floating power unit and the handling of nuclear material, it is necessary to adapt the existing approaches to the application of the IAEA safeguards to this vessel. A key aspect of controlling unauthorized removal of nuclear material is the use of containment and surveillance equipment. Therefore, the article objective is to study a possible approach to the application of the IAEA safeguards to a nuclear floating power unit in terms of installing equipment for containment and surveillance measures. When developing an approach to the application of the IAEA safeguards, the following are taken into account: the life cycle of an atomic floating power unit; peculiarities of nuclear material handling; possibility of object mobility. To achieve a high level of elaboration of the approach in terms of aspects of the application of safeguards, a comparison method is used with similar approaches for land-based nuclear power plants of large capacity. Peculiarities of nuclear material handling at nuclear floating power unit aimed at minimization of nuclear materials proliferation risks are considered. A list of the IAEA containment and surveillance equipment has been compiled, which can be used on the nuclear floating power unit board taking into account the specifics of its operation. Based on the results of the analysis, it can be concluded that the scheme of using the IAEA containment and surveillance equipment on the nuclear floating power unit board is much simpler than at land-based nuclear power plants of high capacity. This scheme can be taken into account in a timely manner already at the stage of detailed design, which will simplify the installation and use of the IAEA containment and surveillance equipment already at the operating facility.

Keywords: FPU, IAEA, nuclear material handling, NPP, non-proliferation, containment and surveillance, safeguards.

Введение

Атомный плавучий энергоблок (далее – ПЭБ) – инновационная разработка российской атомной отрасли является несамоходным судном, которое перемещается с помощью буксира или судна-дока. ПЭБ предназначен для энергоснабжения широкого круга потребителей, нуждающихся в электроэнергии или тепле. Госкорпорация «Росатом» разрабатывает несколько проектов ПЭБ различной конфигурации, отличающихся типом используемого топлива, мощностью реакторных установок и техническим оснащением, адаптированным к тропическим или арктическим районам размещения.

Для реализации на зарубежных площадках предполагается проект ПЭБ-100 мощностью 100 МВт, предназначенный для эксплуатации в прибрежных или удаленных от центральных энергосетей районах, где строительство наземных атомных станций (далее – АЭС) малой или большой мощности нецелесообразно. Проектом ПЭБ-100 интересуются страны Юго-Восточной Азии, Ближнего Востока и Африки. При размещении за пределами Российской Федерации вопросы ядерного нераспространения приобретают первостепенное значение, поскольку судно, как правило, планируется к эксплуатации в странах, не обладающих ядерным оружием, по смыслу Договора

о нераспространении ядерного оружия (далее – ДНЯО).

ПЭБ-100 представляет собой следующее поколение плавучих энергоблоков, разработанное с учетом опыта эксплуатации ПЭБ «Академик Ломоносов» на Крайнем Севере Российской Федерации. На ПЭБ-100 установлены реакторные установки РИТМ-200М, являющиеся дальнейшим развитием интегральных судовых реакторных установок РИТМ-200, успешно применяемых на универсальных атомных ледоколах проекта 22220. В отличие от ПЭБ «Академик Ломоносов», ПЭБ-100 не имеет перегрузочного оборудования и хранилища ядерных материалов на борту. Ключевой особенностью ПЭБ-100 является использование в составе реактора топлива с обогащением урана-235, соответствующего требованиям МАГАТЭ по экспорту гражданских энергетических реакторов и топлива для них. Все операции с ядерным материалом будут проводиться исключительно в Российской Федерации на специализированных предприятиях, обладающих необходимой инфраструктурой, что минимизирует риски распространения ядерных материалов.

Проект ПЭБ-100 отличается мобильностью и предусматривает возможность смены места эксплуатации по истечении срока договора на энергообеспечение определенного региона без необходимости внесения изме-

нений в конструкцию. Мобильность и отсутствие доступа к ядерному материалу за пределами Российской Федерации обуславливают необходимость адаптации подходов к применению гарантий МАГАТЭ, включая применение оборудования мер сохранения и наблюдения со стороны МАГАТЭ.

Жизненный цикл ПЭБ-100

Жизненный цикл ПЭБ включает в себя следующие этапы: проектирование, строительство, транспортирование, ввод в эксплуатацию, эксплуатацию и вывод из эксплуатации. На этапе проектирования ПЭБ учитываются требования к безопасности и экологической защите, а также необходимость функционирования в различных климатических условиях [1].

Согласно модели «Энергофлот» строительство ПЭБ-100, загрузка и последующие перегрузки топлива, а также обслуживание судна осуществляются на территории Российской Федерации. Передача ядерного материала стране размещения ПЭБ-100 не производится. Доступ страны размещения к ядерному топливу ПЭБ-100 исключен. При проектировании учитываются принцип «Устойчивость с точки зрения нераспространения» (Proliferation resistance) и принцип «Учет гарантий МАГАТЭ на стадии проектирования» (SBD, safeguards-by-design). Это позволяет учитывать требования к гарантиям МАГАТЭ на стадии проектирования, сооружения, эксплуатации и вывода объекта из эксплуатации. Цель учета гарантий МАГАТЭ на стадии проектирования – содействие разработке мер сохранения и наблюдения, что позволит сократить до минимума негативное воздействие на оператора и инспектора, не снижая эффективности системы гарантий, улучшить доступ к оборудованию для его технического обслуживания, обеспечить возможность дистанционной передачи данных на площадке. Эти принципы обеспечивают устойчивость ядерного объекта с точки зрения ядерной радиационной безопасности [2].

Для определения возможности постановки ядерного объекта под гарантии и оценки

степени защищенности ядерного объекта гарантиями МАГАТЭ используется подход «Safeguardability», который означает то, насколько легко и эффективно ядерная установка может быть поставлена под гарантии. Применяемые технические и эксплуатационные решения в рамках проекта ПЭБ-100 позволяют сделать вывод о высокой степени «Safeguardability», что обусловлено ограниченным доступом к ядерному материалу в стране размещения, не обладающей ядерным оружием, а также особой компоновкой ПЭБ-100 и другими факторами.

В процессе эксплуатации проектов ПЭБ осуществляется регулярное техническое обслуживание, замена отработавшего ядерного топлива и контроль за безопасностью работы реакторной установки. Загрузка и выгрузка топлива осуществляются непосредственно с борта ПЭБ-100. Перемещение топлива при загрузке происходит через внешние люки в помещение люков и далее через люки аппаратных в аппаратные [3].

В помещении люков проводится визуальный осмотр топлива и проверка его соответствия документации производителя. После загрузки топлива крышка реактора закрывается и герметизируется. Люки аппаратных также закрываются и герметизируются. Далее ПЭБ-100 перевозится в страну размещения и эксплуатируется до окончания топливной кампании, после чего возвращается в Российскую Федерацию для обслуживания и перегрузки [4].

Техническое обслуживание ПЭБ-100 и обращение с топливом планируется осуществлять исключительно в Российской Федерации. Это обусловлено конструктивными особенностями помещений ПЭБ-100, реакторной установки и условиями эксплуатации активной зоны реактора, особенностями эксплуатации перегрузочного комплекса в Российской Федерации. Люки аппаратных могут быть вскрыты и доступ к топливу может быть получен только в Российской Федерации с использованием специализированного перегрузочного оборудования, имеющегося только на специали-

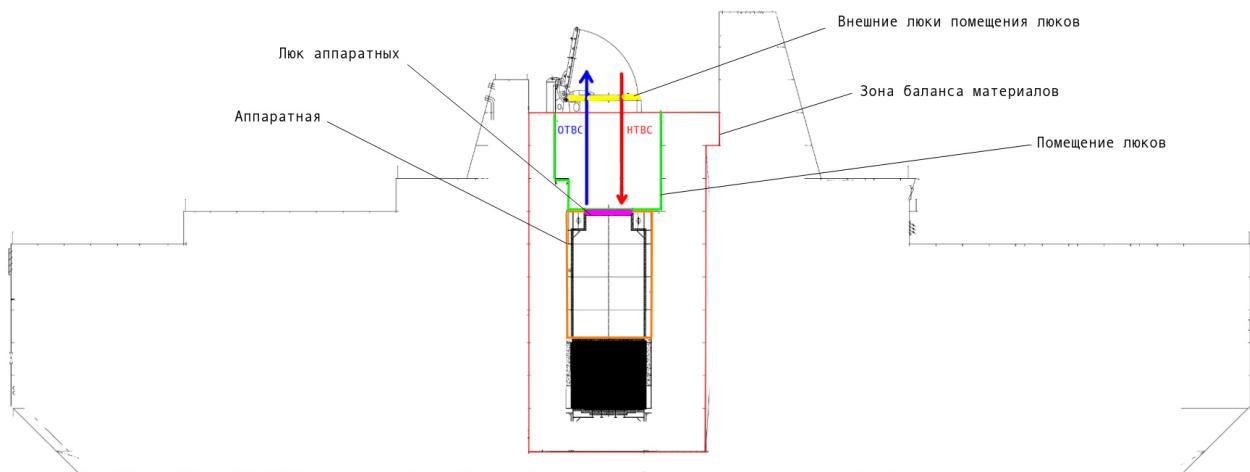


Рисунок 1. Общее расположение оборудования мер сохранения и наблюдения: НТВС – новая тепловыделяющая сборка, ОТВС-отработавшая тепловыделяющая сборка¹

Figure 1. General arrangement of equipment for containment and surveillance measures: NFA - new fuel assembly, SFA-spent fuel assembly¹

зированных предприятиях в Российской Федерации.

Выгрузка топлива осуществляется по тому же маршруту, что и загрузка, но в обратном направлении. Топливо выгружается из реактора с помощью специализированного контейнера через люки аппаратных, затем через помещение люков и покидает борт через внешние люки помещения люков. Доступ к отработавшему топливу в момент выгрузки и после нее на борту ПЭБ-100 исключен. В другие помещения ПЭБ-100, за пределы помещения люков и аппаратной, топливо не попадает, рисунок 1.

После завершения срока службы ПЭБ-100 начинается процесс вывода из эксплуатации. Он включает в себя выгрузку ядерного топлива, дезактивацию оборудования и демонтаж конструкции судна.

Описание деятельности МАГАТЭ

Согласно ст. 3 ДНЯО, МАГАТЭ применяет международные гарантии для проверки выполнения обязательств по нераспространению, которые государства, не обладающие ядерным оружием, взяли на себя

в соответствии с ДНЯО, «чтобы не допустить переключения ядерной энергии с мирного применения на ядерное оружие или другие ядерные взрывные устройства».

Устав МАГАТЭ (п. 5 п. А ст. III) уполномочивает МАГАТЭ устанавливать и проводить в жизнь гарантии, имеющие своей целью обеспечить, чтобы специальные расщепляющиеся и иные материалы, услуги, оборудование, технические средства и сведения, предоставляемые МАГАТЭ, по его требованию или под его наблюдением или контролем, не были использованы таким образом, чтобы способствовать какой-либо военной цели [5]. МАГАТЭ осуществляет контроль переключения ядерного материала с использования в мирных целях на использование не по назначению (создание ядерного оружия), в том числе во время эксплуатации АЭС. Для этого Департамент гарантий Секретариата МАГАТЭ проводит проверочную деятельность в отношении ядерной установки, поставленной под гарантии МАГАТЭ.

ПЭБ-100 в силу своей судовой специфики и мобильности предполагает развитие комплексного подхода к реализации гарантий,

¹ Представлен модифицированный рисунок ПЭБ-100 в продольном разрезе, опубликованный в документе эскизного проекта ПЭБ-100 23870.360050.003 «Общее расположение ОПЭБ», ОПЭБ – оптимизированный плавучий энергоблок, предыдущее наименование ПЭБ-100.

учитывающего правовые и технические вопросы в различных сферах, включая межгосударственное взаимодействие в части ядерного нераспространения [6]. Правовое регулирование объекта оказывает непосредственное влияние на проектирование и техническую составляющую ПЭБ-100.

МАГАТЭ проводит плановые проверки строящихся энергетических объектов, а также прорабатывает алгоритмы проверки инновационных объектов, таких как ПЭБ-100, для обеспечения соблюдения всех норм, требований безопасности и гарантий МАГАТЭ. Эти проверки и инспекции направлены на обеспечение соблюдения международных правовых обязательств в области ядерного нераспространения, а также соответствия строящихся объектов международным нормам безопасности [7].

Деятельность МАГАТЭ играет важную роль при проектировании ядерных установок [8]. Одним из ключевых элементов применения гарантий МАГАТЭ к ядерному материалу или ядерной установке является применение мер сохранения и наблюдения (далее – С/Н) [9].

Оборудование мер сохранения и наблюдения МАГАТЭ и его применение на АЭС с водо-водяными реакторами

В соответствии со статьей 29 INFCIRC/153 (Corrected)² оборудование мер С/Н МАГАТЭ определены в качестве важных мер, которые дополняют материальный учет при выполнении главной цели гарантий: своевременное фиксирование доступа к ядерному материалу или его перемещение. Термин «наблюдение» в контексте гарантий МАГАТЭ определяется как инструментальный или человеческий сбор информации, которая будет использоваться для поддержания «непрерывности знания» о ядерном материале, системе сохранения, имуществе МАГАТЭ и деятельности на площадке для

указания или обнаружения изъятия ядерного материала. Термин «сохранение» означает обеспечение постоянного знания о ядерном материале путем предотвращения необнаруженного доступа к предметам или их перемещения, в том числе с точки зрения предотвращения необнаруженного доступа [10].

При выборе перечня оборудования для использования на конкретном объекте требуется учесть несколько факторов. Во-первых, это достаточность, эффективность и целесообразность используемого оборудования для идентификации предотвращения необнаруженного доступа к ядерному материалу. Это включает такие параметры, как:

- финансовая целесообразность использования оборудования мер С/Н;
- его подверженность износу и выходу из строя;
- своевременность и полнота зафиксированных им данных по обращению с ядерным материалом [11];
- отсутствие противоречий в работе с оборудованием, используемым эксплуатирующей организацией;
- отсутствие раскрытия чувствительной для объекта информации о его эксплуатации, либо об используемых технологиях, составляющих «know-how».

Во-вторых, это учет особенностей обращения с ядерным материалом на конкретном объекте, а также учет особенностей эксплуатации этого объекта. Это подразумевает:

- учет обеспечения электропитания оборудования мер С/Н;
- необходимость сохранения фиксируемых оборудованием данных по обращению с ядерным материалом на долгий срок;
- возможность удаленной передачи данных;
- возможность и целесообразность проверки работоспособности оборудования мер С/Н со стороны МАГАТЭ, а также снятие сотрудниками МАГАТЭ данных об обраще-

² INFCIRC/153 (Corrected) The Structure and Content of Agreements Between the Agency and States Required in Connection with the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons. – Режим доступа: https://www.iaea.org/sites/default/files/infcirc153_rus.pdf (дата обращения: 08.07.2025).

нии с ядерным материалом, зафиксированных этим оборудованием.³

МАГАТЭ имеет широкий перечень оборудования мер С/Н. В перечень входят различные виды пломб, видеокамер, серверов, датчиков нейтронного потока / гамма излучения, камер по анализу эффекта Черенкова-Вавилова и так далее.

Самым простым устройством из оборудования мер С/Н МАГАТЭ является пломба. Пломбы применяются для обнаружения вскрытия тары, входов в помещения и так далее.

МАГАТЭ располагает разными типами пломб, в том числе механическими пассивного принципа действия (FVPS – Field Verifiable Passive Seal/ проверяемая на месте пассивная пломба, CAPS – metal cap seal) и активными с возможностью электронного фиксирования их вскрытия (AUAS – Active Universal Assymmetric Seal/ активная универсальная ассиметричная пломба, EOSS), рисунок 2. При этом пломба любого вида, как правило, состоит из двух частей: тела пломбы и кабеля. Одной из особенностей использования активных пломб МАГАТЭ является возможность удаленной передачи сигнала от пломб через датчик в МАГАТЭ, что позволяет круглосуточно отслеживать состояние пломб на конкретном объекте.

Пломбы, как и другое оборудование мер С/Н, не предотвращают несанкционированный доступ к ядерному материалу, но они фиксируют такой доступ. Их задача – это идентификация несанкционированных действий.

Проверка пассивных и активных пломб может осуществляться путем визуального осмотра, сверки номеров, проверки подлинности и отсутствия вскрытия тела и кабеля пломбы. Например, может быть использован метод микрофотографического сравнения.⁴

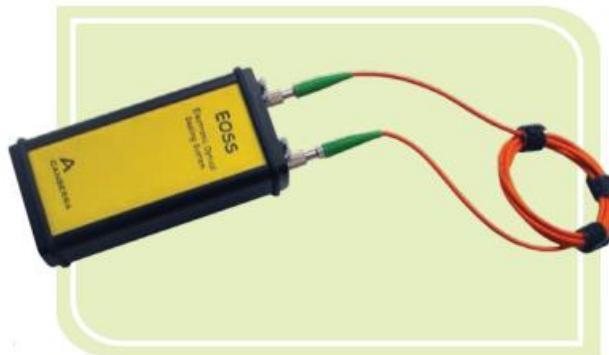


Рисунок 2. Электронная пломба⁵
Figure 2. Electronic seal⁵

Пломбы входят в список оборудования, не предполагающего постоянного присутствия инспектора по гарантиям МАГАТЭ. Кроме пломб в этот перечень также входят камеры видеонаблюдения и некоторые датчики нейтронного потока и гамма излучения.

Также МАГАТЭ использует различные системы видеонаблюдения. Особенностью этого типа оборудования является возможность объединения устройств видеонаблюдения в одну единую систему с помощью сервера. Видеокамеры снимают отдельные кадры, а не полноценный видеоряд, что позволяет обеспечивать их долгую работу без замены записывающего устройства. К такому оборудованию относится камера NGSS (Next generation of surveillance system).

При очных визитах МАГАТЭ используется оборудование для идентификации ядерного материала при его загрузке/выгрузке в/из реактор(а). При этом большая часть этого оборудования является оборудованием неразрушающего принципа действия. Неразрушающий анализ – это метод измерения, применяемый к ядерному материалу для подтверждения его изотопного состава и количества без разрушения предметов. Одним из типов такого оборудования являются весы.

Другим вариантом такого оборудования является оборудование для проверки гаммаизлучения при загрузке или выгрузке ядерного материала из реактора или хранилища топлива. Для проведения изотопного анали-

³ Материалы по оборудованию мер сохранения и наблюдения. – Режим доступа: <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull19-5/19503402026.pdf> (дата обращения: 08.07.2025).

⁴ Документ о гарантиях МАГАТЭ. – Режим доступа: <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull19-5/19503402026.pdf> (дата обращения: 08.07.2025).

⁵ Electronic optical seal. – Режим доступа: <http://www.canberra.com> (дата обращения: 08.07.2025).

за нужен непосредственный доступ к ядерному материалу и определенные тайминги для снятия показаний с образцов.

Для анализа свежего топлива могут использоваться датчики контроля гаммаизлучения, например, HM-5 (Hand held assay probe), рисунок 3.



Рисунок 3. Ручной зонд для анализа гамма излучения, HM-5 [12]

Figure 3. Hand held assay probe for gamma radiation, HM-5 [12]



Рисунок 4. Система на основе германия с электрическим охлаждением, ECGS [12]

Figure 4. Electrically cooled germanium system, ECGS [12]

Для анализа отработавшего топлива могут использоваться также соответствующие датчики (рис. 4,5,6), например, IRAT (Irradiated fuel attribute tester), SFAT (Spent fuel attribute tester). Для обоих наименований оборудования требуется непосредственный доступ к отработавшему топливу.



Рисунок 5. Тестер характеристик облученного топлива, IRAT. Мини-многоканальный анализатор, MMCA [12]

Figure 5. Irradiated fuel attribute tester, IRAT. Mini-multi-channel analyzer, MMCA [12]

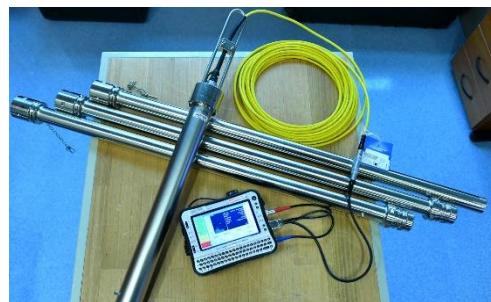


Рисунок 6. Прибор для проверки характеристик отработавшего топлива, SFAT [12]

Figure 6. Spent fuel attribute tester, SFAT [12]

Для исследования нейтронного потока МАГАТЭ использует полуавтономный датчик MUND (Mobile unit neutron detector). Этот датчик не требует непосредственного доступа к топливу, но при этом должно быть обеспечено, чтобы нейтронный поток от ядерного материала не глушился, в частности, биологической защитой реактора или оборудования перегрузочного комплекса.

Также МАГАТЭ использует оборудование мер С/Н для исследования излучения Вавилова-Черенкова XCVD (Next Generation Cherenkov Viewing Device), RCVD (Robotized Cherenkov Viewing Device). МАГАТЭ также используется ICVD (Improved Cherenkov viewing device) (рис. 7) для наиболее точной фиксации наличия отработавшего топлива в бассейнах хранения. Это оборудование проще в использовании по сравнению с оборудованием по исследованию гамма-излучения или нейтронного потока, но требует визуального доступа к ядерному материалу.



Рисунок 7. Усовершенствованный прибор для анализа свечения Черенкова, ICVD [12]

Figure 7. Improved Cherenkov viewing device, ICVD [12]

Весь перечисленный выше спектр оборудования мер С/Н МАГАТЭ широко применяется на наземных АЭС большой мощности.

Применение оборудования мер С/Н на наземных АЭС большой мощности на базе водо-водяных реакторов

На наземных АЭС большой мощности на базе водо-водяных реакторов применяется широкий спектр оборудования мер С/Н. Ключевыми аспектами использования оборудования мер С/Н для наземных АЭС являются:

- нахождение ядерного материала, как правило, сразу в нескольких помещениях объекта (хранилище свежего топлива, реакторный зал, бассейн отработавшего топлива, сухое хранилище);

- доступ к ядерному материалу во время эксплуатации объекта каждые 1–1,5 года топливных перегрузок;
- перемещение топлива между помещениями;
- хранение ядерного материала на объекте.

На рисунке 8 представлена обобщенная схема использования оборудования мер С/Н МАГАТЭ на наземных АЭС большой мощности на базе водо-водяных реакторов с учетом движения ядерного материала [13].

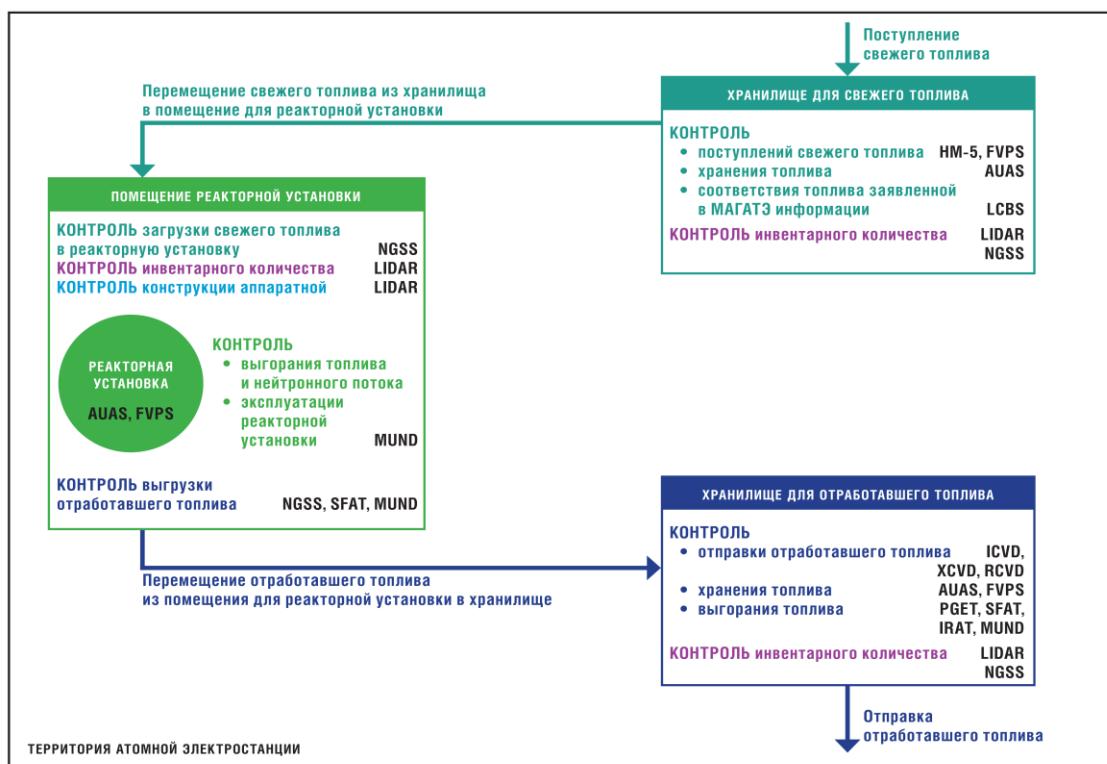


Рисунок 8. Пример схемы контроля ядерного материала на территории АЭС на предмет предотвращения необнаруженного доступа [составлено авторами]

Figure 8. Example of a scheme for monitoring nuclear material on the territory of nuclear power plants to prevent undetected access [compiled by the authors]

В частности, на наземных АЭС большой мощности с водо-водяными реакторами одновременно может использоваться оборудование XCVD, IRAT или SFAT для проверки отработавшего топлива с возможностью выявления дефектов.

Для верификации ядерного материала могут использоваться комбинации приборов по исследованию эффекта Вавилова-Черенкова (XCVD/RCVD). Для использования обору-

дования по исследованию эффекта Вавилова-Черенкова не требуется специальной инфраструктуры на АЭС с водо-водяными реакторами [14].

Также на объектах на базе водо-водяных реакторов могут применяться активные пломбы с оптической электронной системой с целью фиксации отсутствия доступа во время работы реактора.

Для проверки тепловыделяющих сборок и закрытых контейнеров на объектах на базе водо-водяных реакторов может использоваться установка пассивной гамма-эмиссионной томографии (Passive Gamma Emission Tomography – PGET) – прибор неразрушающего анализа. Гамма-излучение, которое проявляется в отработавшем топливе, фиксируется сигналами детекторов CdZnTe, которые подтверждают наличие отдельных облученных твэлов.

С точки зрения видеонаблюдения могут использоваться камеры NGSS (Next generation of surveillance system), рисунок 9, для визуального охвата всей зоны хранения ядерного материала.



Рисунок 9. Единичная камера системы наблюдения следующего поколения [12]

Figure 9. Single next generation of surveillance system camera [12]

Для контроля состояния отработавшего топлива, в том числе в бассейнах хранения, может использоваться система подводной съемки – UWTV (underwater television system), рисунок 10.



Рисунок 10. Подводная телевизионная система (UWTV) [12]

Figure 10. Underwater television (UWTV) system [12]

МАГАТЭ применяет оборудование (LCBS –load cell based weighing system), рисунок 11, для измерения веса массивных объектов, такие как транспортные баллоны UF-6, используемые для хранения гексафторида урана.



Рисунок 11. Система взвешивания на основе мензодатчиков, LCBS [12]

Figure 11. Load cell-based weighing system, LCBS [12]

Также на ядерных объектах с водо-водяными реакторами могут использоваться системы LIDAR. С ее помощью можно зафиксировать несанкционированный доступ к ядерному материалу путем сканирования пространства. Для этого внутри зоны баланса материалов монтируются устройства, оснащенные лазерными сканерами.

В рамках наземных АЭС большой мощности на базе водо-водяных реакторов может применяться «двойная система оборудования мер С/Н», при которой каждый вероятный путь несанкционированного использования ядерного материала идентифицируется двумя устройствами мер С/Н, которые между собой независимы, работают по разному принципу и не подвержены режиму одновременного отказа. Например, два различных типа пломб или пломбы с использованием видеонаблюдения или лазерным сканированием объема помещения. Таким образом, некорректная работа одного типа оборудования мер С/Н компенсируется сохранением работоспособности другого оборудования мер С/Н.

Как для целей контроля наземных АЭС, так и мобильных объектов или грузов постоянно появляются разработки оборудования мер сохранения и наблюдения разного принципа действия, например, контроль источников нейтрино, что теоретически может позволить осуществлять контроль за ядерным материалом без прямого к нему доступа [15].

Применение оборудования мер С/Н на атомном плавучем энергоблоке (ПЭБ-100)

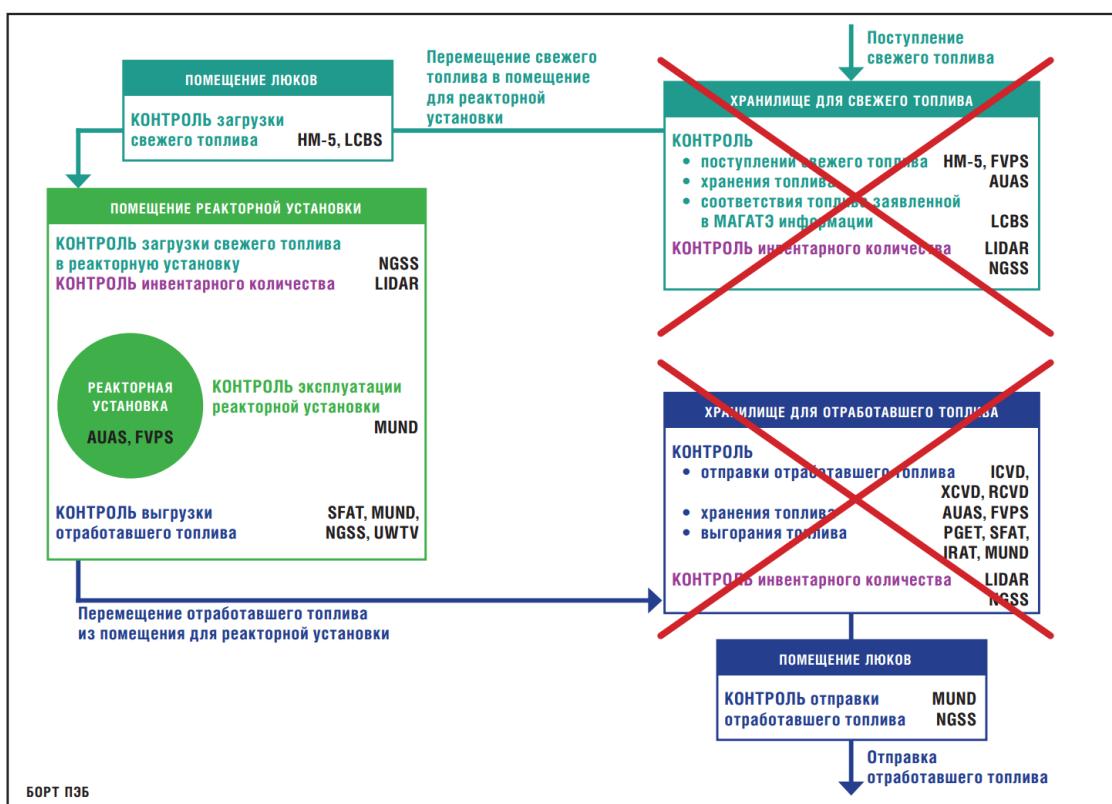
Особенности жизненного цикла ПЭБ-100 определяют специфику использования оборудования мер С/Н на его борту, рисунок 12. Этими аспектами являются:

- особый маршрут движения ядерного материала, который предполагает движение по прямой линии через одно сквозное поме-

щение (помещение люков) и в одно тупиковое помещение (аппаратная);

- отсутствие хранилищ для ядерного материала на борту ПЭБ-100;

- отсутствие доступа к ядерному материалу во время эксплуатации ПЭБ-100 в стране размещения, не обладающей ядерным оружием.



В случае ПЭБ-100 использование ядерного материала на борту и путь его движения прямолинейны по сравнению с наземной АЭС большой мощности на базе водоводяных реакторов. Ядерный материал с технической и регламентной точки зрения может находиться только в реакторе для целей его использования. Процедуры, связанные с его обращением в помещении люков и в аппаратной, связаны только с загрузкой и выгрузкой и не могут быть связаны ни с чем иным, кроме как с движением ядерного материала по маршруту: береговые сооружения – борт ПЭБ-100 – реакторная

установка; реакторная установка – борт ПЭБ-100 – береговые гидротехнические сооружения.

Таким образом, топливо на ПЭБ-100 движется только по одной линии. Компоновка ПЭБ-100 не предполагает перемещение топлива в другие помещения кроме аппаратной и помещения люков. Учитывая компоновку аппаратной и технологические процессы, связанные с обращением с ядерным материалом, описанные выше, представляется возможным установить точку контроля оборудованием мер С/Н МАГАТЭ только на люках аппаратных.

Наиболее подходящим для перманентного использования на ПЭБ-100 оборудованием из состава оборудования мер С/Н МАГАТЭ представляются электронные (активного принципа действия) и механические (пассивного принципа действия) пломбы. Это обусловлено рядом технических параметров:

- активные пломбы не требуют электропитания с борта ПЭБ-100 по сравнению с видеокамерами и датчиками нейтронного потока, которые требуют обеспечение электропитания, обеспечение сохранения фиксируемых ими данных и таким образом несут потенциальный риск потери преемственности знаний о ядерном объекте;
- механические пломбы не требуют регулярного снятия фиксируемой ими информации по сравнению с другим оборудованием мер С/Н, которые собирают большой объем информации и требуют периодического очищения средств сохранения информации с учетом ограниченного объема этих средств и возможного отсутствия доступа к судну, в том числе по причине его удаленности либо нахождения в процессе транспортировки;
- при использовании активных пломб не представляется критичной удаленная передача информации об их работе.

Учитывая, что вскрытие люков аппаратных в стране размещения не предусмотрено, пломбы МАГАТЭ напрямую будут фиксировать отсутствие вскрытия люков аппаратных на протяжении периода от загрузки топлива и до его выгрузки на территории Российской Федерации. Другое оборудование мер С/Н, включая видеокамеры и датчики нейтронного потока / гамма-излучения, может только косвенно фиксировать вскрытие люков аппаратных.

При загрузке топлива со стороны МАГАТЭ представляется возможным использовать оборудование мер С/Н в части измерения гамма-излучения свежего топлива, например, при помощи гамма датчика НМ-5. Использование этого датчика вместе с мерами по проверке со стороны МАГАТЭ заводских маркировок и других данных свежего топлива позволит сформировать пред-

ставление о его изотопном составе и оригинальности.

Выгрузка осуществляется в государстве, обладающим ядерным оружием, и топливо остается в нем на переработку и захоронение. В случае срыва пломб МАГАТЭ может осуществить проверку топлива до его выгрузки путем визуального осмотра маркировок ТВС до их выгрузки.

Также МАГАТЭ может использовать датчики нейтронного потока и гамма излучения для контроля выхода отработавшего топлива за пределы ПЭБ-100.

Заключение

Особенности эксплуатации и технические аспекты конструкции и обращения с топливом ПЭБ-100 позволяют сделать основной упор на оборудовании мер С/Н без снижения их эффективности. По результатам анализа предложен подход по возможному использованию пломб МАГАТЭ и местам их расположения. Оборудование мер С/Н, которое представляется возможным использовать на борту ПЭБ-100, уже используется на АЭС с водо-водяными реакторами.

Представленный в статье вариант постановки ПЭБ-100 под гарантии МАГАТЭ с точки зрения оборудования мер С/Н является одним из возможных вариантов. Окончательный вариант постановки ПЭБ-100 под гарантии МАГАТЭ будет определен по результатам договоренностей с МАГАТЭ на этапе постановки объекта под гарантии и будет обозначен в специальном документе – Приложении по установке.

Выполненный анализ показывает, что с точки зрения применения гарантий МАГАТЭ ПЭБ-100 имеет конструктивно меньше точек контроля по сравнению с наземной АЭС большой мощности. Это объясняется отсутствием в рамках ПЭБ-100 инфраструктуры, требующей контроля с точки зрения нераспространения. Существующий подход по предотвращению необнаруженного доступа к ядерному материалу на наземных АЭС большой мощности представляется возможным оптимизировать и упростить. Это показывает высокий уровень ПЭБ-100 с точки зрения принципа «Safeguardsability».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Райнартц Д. Атомоход Otto Hahn: использование ядерной энергии для морских грузоперевозок. *Атомная техника за рубежом*. 2014;5:28–29. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-tehnika-za-rubezhom_2014_v5/p29/ (дата обращения: 12.07.2025).
 Rajnartcz D. Atomoxod Otto Hahn: ispol'zovanie yadernoj energii dlya morskix gruzoperevozok. Atomnaya tekhnika za rubezhom. 2014;5:28–29. (In Russ.). Available at: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-tehnika-za-rubezhom_2014_v5/p29/ (accessed: 12.08.2025).
2. Алексеев П.Н., Удянский Ю.Н., Щепетина Т.Д. Атомные станции малой мощности – главный путь снижения рисков и их последствий в ядерной энергетике. *Атомная энергия*. 2019;126(4):194–198. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2548/2849> (дата обращения: 12.07.2025).
 Alekseev P.N., Udyanskii Yu.N., Shchepetina T. D. Small nuclear power plants – primary avenue for reducing risks and their consequences in nuclear power. *Atomic energy*. 2019;126(4):194–198. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00540-2>
3. Whitlock J., Sprinkle J. Proliferation resistance considerations for remote small modular reactors. *AECL nuclear review*. 2012;1(2):9–12. Available at: https://www.researchgate.net/publication/275497676_Proliferation_Resistance_Considerations_for_Remote_Small_Modular_Reactors (accessed: 12.08.2025).
4. Душев С.А., Тимофеев А.В., Ермаков А.В., Данилов С.Д., Плотников И.В., Абросимов А.Д. Создание и развитие комплексов и оборудования перезарядки судовых и корабельных реакторных установок. *Атомная энергия*. 2020;129(2):88–95. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3441/4500> (дата обращения: 14.07.2025).
 Dushev S.A., Timofeev A.V., Ermakov A.V. et al. Refueling complexes and equipment for civilian and naval ship reactor installations: creation and development. *Atomic energy*. 2020;129:80–86. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00716-9>
5. Устав Международного агентства по атомной энергии. Режим доступа: https://www.iaea.org/sites/default/files/statute_rus.pdf (дата обращения: 12.08.2025).
 Statute of the International Atomic Energy Agency. Available at: <https://www.iaea.org/about/statute> (accessed: 12.08.2025).
6. Лысенко М.Н. Международное ядерное право – это отрасль международного права? Московский журнал международного права. 2016;(4):11–20. Режим доступа: <https://www.mjil.ru/jour/article/view/196> (дата обращения: 12.08.2025).
 Lysenko M.N. Is the International Nuclear Law a Separate Branch of International Law? Moscow Journal of International Law. 2016;(4):11–20. (In Russ.). Available at: <https://www.mjil.ru/jour/article/view/196> (accessed: 12.08.2025).
7. Невиница В.А., Родионова Е.В., Марова Е.В. МАГАТЭ на АЭС с быстрым реактором и пристаниционным топливным циклом. *Атомная энергия*. 2021;131(2):101–106. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4657/5074> (дата обращения: 12.08.2025).
 Nevinitsa V.A., Rodionova E.V., Marova E.V. Technical and Economic Features of IAEA safeguards application at NPPs with a fast reactor and on-site fuel cycle. *Atomic energy*. 2021;131:102–106. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s10512-022-00846-8>
8. Лысенко М.Н., Беденко В.М., Дальноки-Вересс Ф. Международно-правовое регулирование плавучих атомных электростанций: проблемы и перспективы. *Московский журнал международного права*. 2019;(3):59–67. <https://doi.org/10.24833/0869-0049-2019-3-59-67>
 Lysenko M.N., Bedenko V.M., Dalnoki-Veress F. Legal regulations of floating nuclear power plants: problems and prospects. *Moscow journal of international law*. 2019;(3):59–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.24833/0869-0049-2019-3-59-67>
9. Гулевич А.В., Декусар В.М., Чебесков А.Н., Кучинов В.П., Волошин Н.П. Возможность экспорта быстрых реакторов в условиях международного режима ядерного нераспространения. *Атомная энергия*. 2019;127(3):171–175. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2613/2914> (дата обращения: 12.08.2025).
 Gulevich, A.V., Dekusar, V.M., Chebeskov, A.N. et al. Possibility of fast-reactor exportation under an international nuclear non-proliferation regime. *Atomic energy*. 2020;127:192–195. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s10512-020-00609-3>
10. Dr Ross Peel (King's College London), George Foster (Amport Risk Ltd) and Professor Sukesh Aghara (University of Massachusetts Lowell). *Nuclear Security and Safeguards Considerations for Novel Advanced Reactors*. 2022;(12). 40 p. Available at: <nuclear-security-and-safeguards-considerations-for-novel-advanced-reactors.pdf> (accessed: 12.08.2025).
11. Волков Ю.Н., Гусев В.Е., Смирнов А.Ю., Суладеридзе Г.А., Бландинский В.Ю., Невиница В.А., Фомиченко П.А. Защищенность экспортных поставок топлива легководных реакторов из регенерированного урана с точки зрения гарантий МАГАТЭ. *Атомная энергия*. 2020;128(6):337–344. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3195/4168> (дата обращения: 14.07.2025).

Volkov, Y.N., Gusev, V.E., Smirnov, A.Y. *et al.* Security of export deliveries of regenerated-uranium light-water reactor fuel from the standpoint of IAEA safeguards. *Atomic energy.* 2020;128:368–374. <https://doi.org/10.1007/s10512-020-00701-8>

12. International Atomic Energy Agency. Safeguards Techniques and Equipment: International Nuclear Verification Series No. 1 (Rev. 2), IAEA, Vienna (2011). Режим доступа: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/nvs1_web.pdf (дата обращения: 10.07.2025).

13. Williams A.D., Cohn B., Osborn D. Security, Safety, and Safeguards (3S) Risk Analysis for Small Modular Reactors. *Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA. Proceedings of PATRAM Symposium 2019.* 1–10. Available at: <https://www.sandia.gov/research/publications/details/security-safety-and-safeguards-3s-risk-analysis-for-small-modular-reactors-2019-06-01> (accessed: 12.08.2025).

14. Virgili N. The Impact of Small Modular Reactors on Nuclear Non-Proliferation and IAEA Safeguards. Vienna Center for Disarmament and Non-Proliferation. Available at: <https://vcndp.org/the-impact-of-smrs-on-non-proliferation-and-iaea-safeguards/> (accessed: 12.08.2025).

15. Велихов Е.П., Кузнецов В.П., Кучинов В.П., Скорохватов М.Д. Нейтринный контроль реакторов для применения гарантий МАГАТЭ к плавучим атомным энергоблокам. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов.* 2022;(1):71–73. Режим доступа: <https://nrcki.ru/files/pdf/VANT-2022-01.pdf> (дата обращения: 12.08.2025).

Velikhov E.P., Kuznetsov V.P. Neutrino control of reactors for the application of the IAEA Safeguards to floating nuclear power units. *Problems of nuclear science and engineering. Series: Physics of nuclear reactors.* 2022;(1):71–73. (In Russ.). Available at: <https://nrcki.ru/files/pdf/VANT-2022-01.pdf> (accessed: 12.08.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Просянов А.В. – формирование текста статьи в части применения оборудования мер сохранения и наблюдения;

Лац М.П. – формирование текста статьи в части применения оборудования мер сохранения и наблюдения;

Брыкалов С.М. – редактирование текста статьи перед отправкой в редакцию;

Сальникова Н.А. – редактирование текста статьи перед отправкой в редакцию;

Лазарев А.Е. – редактирование текста статьи перед отправкой в редакцию;

Мальев В.В. – формирование основного текста статьи и рисунков 11 и 12;

Тагирова Т.А. – формирование текста статьи в части введения и заключения;

Чижов А.С. – формирование и форматирование текста статьи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Алексей Владимирович Просянов, советник отдела международных организаций и экспортного контроля Блока международной деятельности Госкорпорации «Росатом», г. Москва, Российская Федерация. e-mail: AlVProsyanyov@rosatom.ru

Максим Петрович Лац, ведущий специалист отдела международных организаций и экспортного контроля Блока международной деятельности Госкорпорации «Росатом», г. Москва, Российская Федерация. e-mail: MPLats@rosatom.ru

Сергей Михайлович Брыкалов, заместитель генерального директора по судовым проектам и проек-

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Prosyanyov A.V. – text formation in terms of the use of containment and surveillance measures equipment;

Lats M.P. – text formation in terms of the use of containment and surveillance measures equipment;

Brykalov S.M. – editing the text of the article;

Salnikova N.A. – editing the text of the article;

Lazarev A.E. – editing the text of the article;

Malev V.V. – formation of the main text and figures 11 and 12;

Tagirova T.A. – text formation in terms of introduction and conclusion;

Chizhov A.S. – formation and formatting of article's text.

FUNDING:

The authors state that there are no sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Alexey V. Prosyanyov, Counsellor, Division of International Organizations and Export Control, International cooperation Unit, Rosatom, Moscow, Russian Federation. e-mail: AlVProsyanyov@rosatom.ru

Maksim P. Lats, Leading specialist, Division of International Organizations and Export Control, International cooperation Unit, Rosatom, Moscow, Russian Federation.

e-mail: MPLats@rosatom.ru

Sergey M. Brykalov, Deputy General Director for Marine Projects and SMR Power Generation Projects Afrikantov

там малой энергетики АО «ОКБМ Африкантов», доктор экономических наук, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-5989-8802>

e-mail: sm-brykalov@okbm.nnov.ru

Надежда Александровна Сальникова, начальник управления нормативно-правовой поддержки проектов АСММ АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-8827-867X>

e-mail: salnikovana@okbm.nnov.ru

Александр Евгеньевич Лазарев, и.о. начальника отдела нормативно-правовой поддержки проектов АСММ АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

e-mail: lazarevae@okbm.nnov.ru

Владимир Владимирович Мальев, специалист 1 категории отдела нормативно-правовой поддержки проектов АСММ АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-5023-6455>

e-mail: malev.vladimir@okbm.nnov.ru

Татьяна Алексеевна Тагирова, специалист 2 категории отдела нормативно-правовой поддержки проектов АСММ АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0006-9418-9298>

e-mail: tagirova.t@okbm.nnov.ru

Андрей Сергеевич Чижов, специалист 3 категории отдела нормативно-правовой поддержки проектов АСММ АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0005-1824-1114>

e-mail: chijov_as@okbm.nnov.ru

OKBM JSC, Dr. Sci. (Econ.), Nizhny Novgorod, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-5989-8802>

e-mail: sm-brykalov@okbm.nnov.ru

Nadezhda A. Salnikova, Head of SMR Legal and Regulatory Department, Afrikantov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-8827-867X>

e-mail: salnikovana@okbm.nnov.ru

Alexander E. Lazarev, Acting Head of SMR Legal and Regulatory Division, Afrikantov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

e-mail: lazarevae@okbm.nnov.ru

Vladimir V. Malev, Specialist (Category 1) of the SMR Legal and Regulatory Division, Afrikantov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-5023-6455>

e-mail: malev.vladimir@okbm.nnov.ru

Tatyana A. Tagirova, Specialist (Category 2) of the SMR Legal and Regulatory Division, Afrikantov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0006-9418-9298>

e-mail: tagirova.t@okbm.nnov.ru

Andrey S. Chizhov, Specialist (Category 3) of the SMR Legal and Regulatory Division, Afrikantov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0005-1824-1114>

e-mail: chijov_as@okbm.nnov.ru

Поступила в редакцию / Received 15.08.2025

После доработки / Revision 23.10.2025

Принята к публикации / Accepted 28.10.2025