

ЭКСПЕРТИЗА КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА ОБРАЩЕНИЯ С КОНСТРУКЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

А. С. Григорьев¹, Н. Н. Сафонова², И. А. Тутнов³

^{1,3} Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

² Ассоциация организаций строительного комплекса атомной отрасли, Москва, Россия

¹ Grigoriev_AS@nrcki.ru, ² safronova_nn@accni.ru, ³ Tutnov_IA@nrcki.ru

Аннотация. Актуальность и цели. Рассмотрены возможные пути решения актуальной задачи экспертизы и диагностического контроля качества специфической продукции оригинальных производств по утилизации демонтированных конструктивных элементов атомных станций в период их вывода из эксплуатации. *Материалы и методы.* Приведен метод расчета вероятностей проявления ошибок в процессе проверки качества готовой продукции серийного производства в сфере утилизации и переработки конструкционных материалов энергоблоков с ядерными реакторами с целью повторного применения этой продукции, материалов и изделий по новому назначению. Предложен метод экспертизы качества такой продукции, оценен результат – уменьшение вероятности пропуска дефектной продукции при контроле нескольких параметров, определяющих физико-техническую ценность замкнутого цикла обращения с конструкционными материалами атомных станций. Метод открывает возможность: оптимально, по критериям рационального природопользования и экологической приемлемости, экономической целесообразности, выбрать и оценить эффективность различных сочетаний инструментальных средств неразрушающего диагностического контроля и экспертизы качества готовой продукции в целом; по результатам оценки качества готовой продукции определить технологическую карту межоперационного и выходного контроля для производства по переработке демонтированных конструктивных компонентов атомных электростанций на этапе ликвидации их негативного ядерного наследия. *Результаты и выводы.* Представлены и обоснованы основные научные положения и принципы, на базе которых строится метод системного анализа и экспертизы качества продукции в формате замкнутого цикла обращения с конструкционными материалами ядерных энергетических установок.

Ключевые слова: атомная электрическая станция, вывод из эксплуатации, безопасность, метод контроля, надежность производственного контроля качества продукции

Финансирование: статья подготовлена при выполнении государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» в рамках выполнения договора № 210/494-24.

Для цитирования: Григорьев А. С., Сафонова Н. Н., Тутнов И. А. Экспертиза качества продукции замкнутого цикла обращения с конструкционными материалами атомных станций // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 3. С. 70–81.
doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-7

QUALITY PRODUCTS EXAMINATION AT CLOSED-CYCLE INDUSTRIES NUCLEAR POWER PLANT STRUCTURAL MATERIALS

A.S. Grigoriev¹, N.N. Safronova², I.A. Tutnov³

^{1,3} National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

² Association of Nuclear Industry Construction Organizations, Moscow, Russia

¹ Grigoriev_AS@nrcki.ru, ² safronova_nn@accni.ru, ³ Tutnov_IA@nrcki.ru

Abstract. Background. The article considers the way to solve the urgent problem of expertise and quality testing of specific products of original production facilities for the utilization of dismantled structural elements of nuclear power plants during their decommissioning. *Materials and methods.* The methodology for calculating the probabilities of errors in the process of checking the quality of finished products of mass production in the field of utilization and processing of structural materials of power units with nuclear reactors, in order to reuse these products, materials and products for a new purpose, is presented. A method of examining the quality of such products is proposed, and the result is estimated – reducing the likelihood of defective products being missed when inspecting several parameters that

determine the physic technological value of a closed cycle of handling structural materials of nuclear power plants. The method opens up the possibility to optimally select and evaluate the effectiveness of various combinations of tools for non-destructive examination the finished products quality of in general, according to the criteria of rational use of natural resources and environmental acceptability, economic feasibility; Based on the results of the evaluation of the quality of finished products, determine the technological map of output examination for the processing of dismantled structural components of nuclear power plants at the stage of eliminating their negative nuclear legacy. *Results and conclusions.* The presentation and substantiation of the main scientific provisions and principles on the basis of which a system analysis of product quality is based in a closed-loop format for handling structural materials of nuclear power plants.

Keywords: nuclear power plant, decommissioning, safety, control method, reliability of production quality control

Financing: the article was prepared while fulfilling the state assignment of the NRC "Kurchatov Institute" in the framework of the implementation of contract No. 210/494-24.

For citation: Grigoriev A.S., Safronova N.N., Tutnov I.A. Quality products examination at closed-cycle industries nuclear power plant structural materials. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(3):70–81. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-7

Введение

К настоящему времени при формировании технических решений в сфере деятельности по массовому выводу из эксплуатации АЭС предложено ориентироваться на процессы [1, 2], относящиеся к развитию и созданию замкнутого цикла переработки металлических и иных отходов атомной отрасли, обеспечивающего возврат в атомную индустрию вторичных продуктов переработки конструкционных материалов и изделий ядерных энергетических установок (ЯЭУ). До 2040 г. в мире предполагается вывести из эксплуатации более 150 ядерных реакторов. На сегодня в России уже остановлено 10 энергоблоков АЭС, они находятся в состоянии ликвидации негативных последствий их промышленного функционирования. Планируется, что к 2040 г. будут окончательно остановлены более 25 энергоблоков с ядерными энергетическими реакторами, выведены из эксплуатации многие исследовательские ЯЭУ и другие объекты использования атомной энергии, что приведет к существенным затратам для смягчения вредных последствий использования атомной энергии. По экспертным оценкам многих специалистов, общие затраты на вывод из эксплуатации одного энергоблока АЭС в текущих ценах оцениваются в \$ 2–3 млрд [1, 3]. Поэтому актуальной научной проблеме по снижению общих затрат и объема требуемых ресурсов для ликвидации негативного ядерного наследия ЯЭУ, с одновременным повышением эффективности, безопасности и экологической приемлемости деятельности по массовому выводу из эксплуатации АЭС, в текущий период уделяется особое внимание специалистов и экспертов разного междисциплинарного профиля.

По экспертным оценкам специалистов при выводе из эксплуатации одного энергоблока с ядерными реакторами типа ВВЭР [4] первых поколений образуется около 50 000 т демонтированных металлоконструкций и металлических отходов. Из общего количества продуктов демонтажа энергоблока, предназначенных для утилизации, только небольшая часть этой металлической продукции и отходов – около 1,5 % демонтированного оборудования и металлоконструкций, включая крупные фрагменты корпусов ядерного реактора, циркуляционных насосов теплоносителя первого контура, парогенератора и их внутренних устройств, а также элементы главных циркуляционных трубопроводов имеют опасные радиоактивные загрязнения. Основная же масса демонтированных фрагментов конструктивных компонентов ЯЭУ и образующихся различных металлических отходов, инструментальных средств и приспособлений, применяемых для ликвидации АЭС, будет иметь уровень фактической активности, относящийся к радиоактивным отходам категории: низко активные и очень низко активные [5]. Накопленный опыт проведения масштабных работ по выводу из эксплуатации АЭС [2, 6–8], дезактивации демонтированных фрагментов металлических конструкций и отходов свидетельствует, что следует ожидать – до 99 % объема демонтированного металла может быть выведено из-под радиационного контроля и впоследствии переработано в новую полезную продукцию. Затем эта металлическая продукция может быть предложена к повторному использованию во многих сферах хозяйственной деятельности страны по новому назначению. Это обстоятельство определяет существенную значимость и физико-технологическую ценность замкнутого цикла обращения с конструкционными материалами атомных станций и важность формирования адекватных технических решений по контролю качества и надежности в сфере специализированных производств по обращению с металлическими отходами демонтированных энергоблоков АЭС, а также утилизации, переработки этих отходов в состояние, пригодное для повторного использования конверсионного металла ЯЭУ по новому назначению.

Научный поиск решения проблемы эффективного вывода из эксплуатации ЯЭУ, которая является одной из основных для мировой атомной энергетики [2] на ближайшие годы, определяет актуальность темы данной публикации в аспектах разработки новых методов и средств для выполнения экспертизы качества продукции замкнутого цикла обращения с конструкционными материалами атомных станций, а также системного проектирования, анализа приемлемости технических решений в сфере надежности, безопасности и защиты окружающей среды при реализации замкнутого цикла обращения с конструкционными материалами атомных станций на индустриальной основе.

Постановка задачи

Пока отсутствуют универсальные решения инженерных задач массового вывода АЭС из эксплуатации, что требует разработки множества адекватных реальным обстоятельствам технических решений, их классификационного объединения и применения для эффективного планирования и управления технологическими процессами ликвидации ядерного наследия атомной энергетики [1, 9]. Актуальность и цель поиска лучшего технического решения практических инженерных задач по выводу из эксплуатации АЭС и смягчения последствий негативного ядерного наследия мирного атома в ближайшем будущем определяется тем, что заключительный период жизненного цикла АЭС предполагает утилизацию, окончательное захоронение опасных радиоактивных материалов и изделий, конструктивных компонентов энергоблока и его ликвидацию в целом [5, 10, 11]. С другой стороны, вызовы современности по рациональному природопользованию, инновационной и инвестиционной эффективности, социальной приемлемости рисков в деле сохранения окружающей среды и чувствительного обращения с промышленными и иными отходами в атомной энергетике определяют вектор практической деятельности по выводу из эксплуатации АЭС в новом научном направлении – формирование технических условий для реализации замкнутого цикла обращения с конструкционными материалами (ЗЦОКМ) энергоблоков АЭС. Данный цикл априори предполагает возможность многократного использования конструкционных материалов и даже изделий или деталей, отработавших свой срок эксплуатации в составе конструктивных компонентов энергоблока, но еще пригодных и безопасных для повторного применения по новому назначению в атомной энергетике и смежной с ней отраслях промышленности. Итоговым результатом ЗЦОКМ АЭС, со всей очевидностью, должно быть высокое качество и надежность конверсионной продукции.

Таким образом, важным и своевременным становится поиск путей решения задачи по организации производственного диагностического контроля показателей надежности и безопасности применения конверсионных металлических материалов ЯЭУ по новому назначению.

На этом пути в совершенствовании методологии индустриализации процессов вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС в формате ЗЦОКМ АЭС будет эффективен системный анализ технических решений по становлению системы выходного технологического контроля конверсионной продукции, метрологического обслуживания измерительных приборов, приборов контроля и автоматики, информационно-измерительных и управляющих систем, которые используются в качестве инструментальных средств для обеспечения надежности выходного контроля качества продукции предприятий по обращению и утилизации демонтированных конструктивных компонентов АЭС. Вероятностные показатели точности диагностических и тестовых измерений служебных характеристик конверсионной продукции в формате ЗЦОКМ АЭС, а также итоговая достоверность экспертизы качества этой продукции отражают правильность и точность моделей системного анализа рисков повторного использования конструкционных материалов АЭС. Поэтому выбор принципов, на основе которых строится система контроля качества и надежности, метрологического обслуживания диагностических и иных инструментальных средств промышленных производств ЗЦОКМ АЭС следует проводить, прежде всего, исходя из заданной точности моделирования процессов старения и прогнозирования физической долговечности технологических компонентов конверсионной продукции. Отсюда следует необходимость оценки достаточности и возможных ошибок при проведении выходного контроля качества конверсионной продукции с использованием фундаментальных положений системного анализа безопасности сложных динамических систем и рекомендаций, изложенных в монографии [12]. Таким образом, основой для постановки задачи о разработке метода экспертизы качества продукции ЗЦОКМ АЭС в нашем случае будут *научные положения и принципы*, на базе которых обеспечивается идентификация результатов выводного контроля в аспектах надежности готовой продукции и ее функциональной безопасности.

Основная часть – положения и принципы экспертизы качества продукции замкнутого цикла обращения с конструкционными материалами атомных станций

Имитационное моделирование возможных рисков и опасностей при реализации на практике ЗЦОКМ [13] показывает важную необходимость контроля выводного качества конверсионной продукции на системной основе. Поэтому первый принцип, который должен лежать в основе концепции метода экспертизы качества продукции ЗЦОКМ АЭС, – объективная достаточность точности и достоверности измерений, сформированных на их основе прогнозов о фактическом техническом состоянии и ресурсе конверсионных материалов. Следует отметить, что экспертиза качества продукции ЗЦОКМ АЭС предполагает, что будут дополнительные затраты на культуру безопасности и качество эксплуатации ядерной техники и энергетических объектов. Поэтому второй принцип для построения метода экспертизы качества продукции ЗЦОКМ АЭС – умеренность в затратах индустриального производства для ликвидации опасного ядерного наследия. Для этого необходимы оценки стоимости услуг по технологическому обслуживанию, вероятностные данные о расходе материалов и инструмента, а также сведения о динамике изменений первоначальных заданий. Характеристики конверсионной продукции как объекта технологического обслуживания можно получить в процессе анализа многомерных статистических данных о безопасности жизненного цикла обращения с демонтированными конструктивными компонентами АЭС. На основе данного принципа можно оценить вероятности изменений заданий и состояния внешней среды в ходе решения задач ЗЦОКМ АЭС. Вместе с этим значимые факторы для обеспечения радиационной защиты всех видов деятельности при обращении с демонтированными конструкциями и радиоактивными отходами для всех периодов реализации ЗЦОКМ АЭС значительно будут влиять на архитектуру метода экспертизы качества продукции ЗЦОКМ АЭС. В первую очередь это будут факторы: многоуровневой неопределенности рисков при реализации ЗЦОКМ АЭС и неподготовленности нормативно-правовой базы для повторного использования конструкционных материалов АЭС по новому назначению после их окончательной дезактивации и вторичной конверсионной переработки. В этой связи научные положения и подход, принципы проектирования метода экспертизы качества продукции ЗЦОКМ АЭС важно ориентировать на реализацию технических решений, открывающих перспективную возможность высвободить из-под радиационного контроля материалы демонтажа конструкций и изделий, пригодных для повторного использования с целью развития атомной индустрии и смежных с ней отраслей промышленности, ТЭК на платформе эффективности и рационального использования природных и иных ресурсов.

Рыночные условия хозяйственной деятельности в атомной промышленности требуют [14], чтобы величина затрат на условную единицу полезного эффекта ЗЦОКМ АЭС была меньше, чем у продукции конкурента. Важная роль для улучшения соотношения «рыночная цена/качество» конверсионной продукции ЗЦОКМ АЭС отводится интегрированной с производственными процессами информационной среде выходного контроля надежности и функциональной безопасности такой продукции. Целевая функция этой среды [15] состоит не только в реализации принципа единства диагностических измерений для всех этапов жизненного цикла продукции ЗЦОКМ АЭС, но и в обеспечении метрологическими эталонами и стандартными образцами соответствующих производственных структур на базе объективных служебных характеристик и показателей качества готовой продукции. Это создает необходимые условия для создания и применения специализированных АСУ ТП, которые в свою очередь повышают конкурентную способность конверсионной продукции. Поэтому концепцию метода экспертизы качества продукции ЗЦОКМ АЭС следует рассматривать совместно с системами управления качеством, управления ресурсами и процессами производства на базе стандартов качества ИСО 9000:2000, ИСО 15531 и рекомендаций МЭК [16].

Сказанным выше в целом определяется свод концептуальных положений и научные принципы совершенствования методов и технологии выходного контроля качества продукции оригинальных производств ЗЦОКМ АЭС.

Пример метода экспертизы качества продукции оригинальных производств по конверсии демонтированных конструктивных компонентов АЭС

К числу основных результатов оригинальных производств ЗЦОКМ АЭС следует отнести показатели достоверности выходного контроля качества выпускаемой продукции, конверсионных металлических материалов для АЭС. В первую очередь к ним относятся вероятности пропуска брака в ходе

технологической проверки соответствия состояния готовой продукции заданным техническим условиям. Пока методы и критерии для оценки качества и служебных показателей продукции в формате ЗЦОКМ АЭС, экспертной оценки возможности ошибок при выполнении технологических процедур выходного контроля основываются на применении совокупности методов неразрушающих испытаний, технической диагностики и технологического контроля [17, 18], но они рассмотрены недостаточно полно. В этой связи возможный путь к решению указанной задачи состоит в следующем.

Предположим, что при каждой процедуре выходного контроля качества конверсионных материалов АЭС в формате производств ЗЦОКМ контролирующей аппаратурой регистрируется информативный параметр диагностического сигнала x_i ($i = 1, \dots, k$), несущий информацию о качестве контролируемого готового продукта. В силу статистического разброса свойств этого продукта или его отдельных служебных показателей надежности, безопасности, экологической приемлемости и прочего для будущего, состав информативных параметров $\{x_i\}$ можно рассматривать как реализацию случайного вектора $\mathbf{x} = (x_1; x_2; \dots; x_k)$. Для определенности можем предположить, что информативные параметры экспертизы качества готового продукта ЗЦОКМ АЭС являются непрерывными случайными величинами. Тогда, согласно статистической теории, правило браковки сводится к проверке выполнения альтернативных неравенств [19]:

$$\begin{aligned} L(\mathbf{x}) &= \frac{p(\mathbf{x} | A_1)}{p(\mathbf{x} | A_0)} > L^*; \\ L(\mathbf{x}) &= \frac{p(\mathbf{x} | A_1)}{p(\mathbf{x} | A_0)} < L^*, \end{aligned} \quad (1)$$

где $L(\mathbf{x})$ – отношение правдоподобия; $p(\mathbf{x} | A_0)$ и $p(\mathbf{x} | A_1)$ – условные плотности вероятностей зарегистрировать вектор информативных параметров \mathbf{x} в случае годного (гипотеза A_0 об отсутствии дефектов) и негодного (альтернативная гипотеза A_1 о наличии несоответствия техническим условиям) для готового продукта изделий; L^* – критическое значение, рассчитываемое с помощью выбранного критерия обнаружения [20].

Заметим, что в случае нормального распределения взаимозависимых компонент $\{x_i\}$ вектора \mathbf{x} для вычисления $L(\mathbf{x})$ применяют выражения, приведенные в работах [15, 18–20]. Однако последние справедливы при условии равенства средних значений и дисперсий случайных параметров $\{x_i\}$. Эти условия характерны для повторных, многократных экспертиз качества одинаковых конверсионных материалов и изделий, реализуемых одним и тем же методом. В случае, если по технологическим условиям выходного контроля качества в формате производства ЗЦОКМ АЭС различными диагностическими методами [17, 18] указанные условия не выполняются, тогда условные плотности вероятностей $p(\mathbf{x} | A_0)$ и $p(\mathbf{x} | A_1)$ в (1) можно установить по данным предварительных испытаний изделий двух серий, о которых априорно известно, что они содержат только негодные и годные изделия. Эти серии называют «обучающими» сериями серийного производства в формате ЗЦОКМ АЭС [1].

Выберем готовый продукт ЗЦОКМ АЭС, например некоторое изделие, изготовленное из конструкционного материала демонтированных конструктивных компонентов ядерного реактора, и про-контролируем его служебные показатели совокупностью технических средств. В дальнейшем параметры распределений служебных характеристик таких изделий ЗЦОКМ АЭС будем снабжать индексом q , принимающим значения 0 или 1 соответственно для годных и негодных изделий. Получим вектор служебных параметров изделия \mathbf{x} . При принятом допущении он описывается нормальным законом распределения [12, 18, 20]. Пусть через $\mathbf{x}_q = (x_{q1}; x_{q2}; \dots; x_{qn})$ – среднее значение вектора параметров \mathbf{x} , а $\{\sigma_{qi}^2\}$, ($i = 1, \dots, k$) – их дисперсии. Индекс q принимает значения 0 или 1 в зависимости от того, из какой серии технологической операции выходного контроля было взято готовое изделие. Характеристики x_{qi} и σ_{qi}^2 вычисляются по хорошо известным выражениям [12, 20]. Если

ввести нормированный вектор \mathbf{n}_q с компонентами $n_i^{(q)} = (x_i - \bar{x}_{qi})/\sigma_{qi}$, ($i=1,\dots,k$), тогда плотность вероятности зарегистрировать в результате испытаний выбранного изделия реализацию \mathbf{x} можно записать в виде

$$p(\mathbf{x}; \mathbf{x}_q) = \exp\left(-\mathbf{n}_q^\top \mathbf{R}_q^{-1} \mathbf{n}_q / 2\right) / \left(2\pi\right)^{k/2} \sqrt{\det \mathbf{R}_q} \prod_{i=1}^k \sigma_{qi} . \quad (2)$$

Здесь и далее \mathbf{R}_q^{-1} – матрица, обратная ковариационной матрице \mathbf{R}_q , элементы которой являются коэффициентами корреляции между компонентами вектора \mathbf{x} :

$$(\mathbf{R}_q)_{ij} = \begin{cases} r_{ij}^{(q)}, & i \neq j; (i, j = 1, \dots, k); \\ 1, & i = j. \end{cases}$$

Штрих у векторов и индекс «т» у матриц в дальнейшем будут означать операцию транспонирования.

Вектор \mathbf{x}_q ($q=1,2$) меняется от изделия к изделию в каждой серии по причине неизбежных небольших неконтролируемых (случайных) изменений технологических условий производства. Следовательно, он также является случайным вектором, дисперсия компонент которого характеризует рассеяние технических характеристик годных и негодных изделий каждой серии готового продукта ЗЦОКМ АЭС. Для нормального закона распределения взаимозависимых компонент вектора \mathbf{x}_q запишем выражение для плотности вероятности, чтобы получить при экспертизе качества изделий в условиях производства ЗЦОКМ АЭС из соответствующих контролируемых партий среднее значение $\tilde{\mathbf{x}}_q$:

$$p(\mathbf{x}_q; \tilde{\mathbf{x}}_q) = \exp\left(-\mathbf{v}_q^\top \mathbf{T}_q^{-1} \mathbf{v}_q / 2\right) / \left(2\pi\right)^{k/2} \sqrt{\det \mathbf{T}_q} \prod_{i=1}^k \tilde{\sigma}_{qi} , \quad (3)$$

где вектор \mathbf{v}_q имеет координаты $v_i^{(q)} = (x_{qi} - \tilde{x}_{qi})/\tilde{\sigma}_{qi}$; $\tilde{\mathbf{x}}_q$ – вектор средних значений \mathbf{x}_q , характеризующий усредненные информативные параметры соответственно всех бездефектных и дефектных изделий «обучающих» партий. Остальные обозначения введены по аналогии с обозначениями формулы (2).

Условные плотности вероятностей, входящие в неравенства (1), можно рассчитать по формуле

$$p(\mathbf{x} | A_q) = \int p(\mathbf{x}; \mathbf{x}_q) p(\mathbf{x}_q; \tilde{\mathbf{x}}_q) d\mathbf{x}_q . \quad (4)$$

Интегрирование проводится по области изменения параметров \mathbf{x}_q , ($q=0,1$). После подстановки соответствующих плотностей вероятности (4) принимают вид

$$p(\mathbf{x} | A_q) = \left(\prod_{i=1}^k \sigma_{qi} \tilde{\sigma}_{qi} \right)^{-1} / \left(2\pi\right)^k \sqrt{\det \mathbf{R}_q \det \mathbf{T}_q} \int \exp\left\{-[\mathbf{n}_q^\top \mathbf{R}_q^{-1} \mathbf{n}_q - \mathbf{v}_q^\top \mathbf{T}_q^{-1} \mathbf{v}_q]/2\right\} d\mathbf{x}_q .$$

В результате вычислений легко убедиться, что $p(\mathbf{x} | A_q)$, ($q=0,1$) подчиняются нормальному закону распределения:

$$p(\mathbf{x} | A_q) = \left[\left(\prod_{i=1}^k \sigma_{qi} \right)^{-1} \det(\mathbf{L}_q^{-1}) / \left(2\pi\right)^k \sqrt{\det \mathbf{R}_q \det \mathbf{T}_q} \right] \exp\left\{-[\mathbf{y}_q^\top \mathbf{H}_q^{-1} \mathbf{y}_q]/2\right\},$$

а отношение правдоподобия $L(\mathbf{x})$ в соотношениях (1) принимает вид

$$L(\mathbf{x}) = \sqrt{\frac{\det \mathbf{R}_0 \det \mathbf{T}_0}{\det \mathbf{R}_1 \det \mathbf{T}_1}} \frac{\det \mathbf{L}_1^{-1}}{\det \mathbf{L}_0^{-1}} \prod_{i=1}^k \frac{\sigma_{0i}}{\sigma_{1i}} \exp\left\{-[\mathbf{y}_1^\top \mathbf{H}_1^{-1} \mathbf{y}_1 - \mathbf{y}_0^\top \mathbf{H}_0^{-1} \mathbf{y}_0]/2\right\} .$$

В последних выражениях приняты обозначения: \mathbf{y}_p , ($p=0,1$) – вектора с компонентами $y_i^{(p)} = (x_i - \tilde{x}_{pi})/\tilde{\sigma}_{pi}$; матрицы \mathbf{H}_p определяются следующими выражениями:

$$\mathbf{H}_p = \mathbf{Z}_p - \mathbf{Z}_p \mathbf{G}_p^{-1} \mathbf{Z}_p; \quad \mathbf{Z}_p = \mathbf{D}_p^T \mathbf{N}_p^{-1} \mathbf{D}_p;$$

элементы диагональной матрицы \mathbf{D}_p равны $(D_p)_{ij} = \delta_{ij} \tilde{\sigma}_{pi} / \sigma_{pi}$ (δ_{ij} – символ Кронекера); $\mathbf{G}_p = \mathbf{Z}_p + \mathbf{T}_p^{-1}$; матрицы \mathbf{L}_p^{-1} – обратные к треугольной матрице \mathbf{L}_p , являющейся разложением Холлерицкого [15, 20], т.е. симметричной матрицы $\mathbf{G}_p = \mathbf{L}_p^T \mathbf{L}_p$. Если ввести матрицу \mathbf{B} с элементами $B_{ij} = \delta_{ij} \tilde{\sigma}_{0i} / \tilde{\sigma}_{1i}$ и вектор с координатами $u_{ij} = (\tilde{x}_{0i} - \tilde{x}_{1i}) / \tilde{\sigma}_{0i}$, можно записать соотношение, связывающее векторы \mathbf{y}_0 и \mathbf{y}_1 , $\mathbf{y}_1 = \mathbf{B}(\mathbf{y}_0 - \mathbf{u})$, тогда соотношение правдоподобия можно представить в виде

$$L(\mathbf{x}) = L(\mathbf{y}_0) = W \exp\left\{-[\mathbf{y}'_0 (\mathbf{B}^T \mathbf{H}_1 \mathbf{B} - \mathbf{H}_0) \mathbf{y}_0 + 2\mathbf{u}' \mathbf{B}^T \mathbf{H}_1 \mathbf{B} \mathbf{y}_0]/2\right\}, \quad (5)$$

в котором константа W равна

$$W = \sqrt{\frac{\det \mathbf{R}_0 \det \mathbf{T}_0}{\det \mathbf{R}_1 \det \mathbf{T}_1}} \frac{\det \mathbf{L}_1^{-1}}{\det \mathbf{L}_0^{-1}} \prod_{i=1}^k \frac{\sigma_{0i}}{\sigma_{1i}} \exp\left\{-[\mathbf{m}' \mathbf{B}^T \mathbf{H}_1 \mathbf{B} \mathbf{m}] / 2\right\}.$$

Отношение правдоподобия (5) являются обобщением известных формул, полученных в предположении равенства средних значений $\tilde{x}_{0i} = \tilde{x}_{1i}$ [18, 20] или среднеквадратических отклонений $\sigma_{0i} = \tilde{\sigma}_{0i} = \sigma_{1i} = \tilde{\sigma}_{1i}$ [12].

Выбор критического значения отношения правдоподобия в формуле (1) L^* зависит от выбранного критерия обнаружения и связан с задачей определения вероятности ошибок контроля первого α_1 и второго α_2 рода [12]. Для этого введем функцию

$$\beta(s) = \ln \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[sL(\mathbf{y}_0)] p[L(\mathbf{y}_0) | A_0] d\mathbf{y}_0 \right\}, \quad (0 \leq s \leq 1). \quad (6)$$

Здесь параметр s – корень уравнения $d\beta(s)/ds = \ln L^*$; $p[L(\mathbf{y}_0) | A_0]$ – условная плотность вероятности распределения отношения правдоподобия $L \equiv L(\mathbf{y}_0) \equiv L(\mathbf{x})$, как функция вектора \mathbf{y}_0 – в случае справедливости гипотезы A_0 о годности изделия. Поскольку $L = L(\mathbf{x})$ зависит от случайного вектора \mathbf{x} , отношение правдоподобия можно рассматривать как случайную величину, плотность вероятности которой в случае справедливости гипотезы A_0 о годности (соответствию показателям качества) контролируемого изделия выражается через функцию $\beta(s)$ следующим образом:

$$p_s(L) = p(L | A_0) \exp\{sL\} / \exp\{\beta(s)\}, \quad (7)$$

где принято обозначение $p(L | A_0) = p(L(\mathbf{x}) | A_0)$. Вероятности ошибок контроля при этом рассчитываются по формулам при $s = s^*$, рассчитываемого на основании используемого критерия обнаружения:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \exp\{\beta(s) - s \ln L^*\} \int_0^\infty \exp\{-s\sqrt{\beta''(s)}\} p_s(L) dL; \\ \alpha_2 &= \exp\{\beta(s) + (1-s) \ln L^*\} \int_{-\infty}^0 \exp\{(1-s)\sqrt{\beta''(s)}\} p_s(L) dL. \end{aligned} \quad (8)$$

В работах [15, 20] показано, что функцию $\beta(s)$ можно представить в виде

$$\beta(s) = s \ln W + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[\frac{z_i^2}{1 - \lambda_i s} s^2 - \ln(1 - \lambda_i s) \right]. \quad (9)$$

Для нашего случая параметры, входящие в формулу (7), имеют следующий смысл: λ_i – собственные значения матрицы $(\mathbf{F}^{-1})^T (\mathbf{H}_0 - \mathbf{B}^T \mathbf{H}_0 \mathbf{B}) \mathbf{F}^{-1}$ (\mathbf{F} – верхняя треугольная матрица,

представляющая собой разложение Холлерацкого матрицы \mathbf{H}_0 ; z_i – координаты вектора $\mathbf{z} = \mathbf{m}' \mathbf{B} \mathbf{F}^{-1} \mathbf{Q}$ (в свою очередь, матрица \mathbf{Q} составлена таким образом, что ее столбцами являются ортогональные собственные векторы матрицы $(\mathbf{F}^{-1})^T (\mathbf{H}_0 - \mathbf{B}^T \mathbf{H}_0 \mathbf{B}) \mathbf{F}^{-1}$). Функция $\beta(s)$ удовлетворяет условиям $\beta(0) = \beta(1) = 0$, которые можно использовать для проверки выполненных расчетов. Соотношения (7) являются обобщением формул для расчетов вероятностей ошибок экспертизы качества изделий и сложных динамических систем выходного контроля конверсионной продукции [12, 20], которые справедливы на случай произвольного закона распределения случайной величины $L(\mathbf{x})$. В частности, можно убедиться, что в случае нормального распределения компонент вектора информативных параметров при выходном контроле в условиях серийного производства предприятий ЗЦОКМ АЭС вероятности ошибок первого и второго рода вычисляются по формулам

$$\alpha_j = \exp[-\vartheta_j(s)] \left\{ \exp(\gamma_j^2/2) [1 - F(\gamma_j)] \left[1 + \sum_{k=3}^{\infty} \frac{(-1)^{kj}}{k!} c_k \gamma_j^k \right] - \right. \\ \left. - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{k=3}^{\infty} \sum_{m=0}^{k-1} \frac{(-1)^{(k+m)j}}{k!} c_k \gamma_j^{k-m-1} H_m(0) \right\}, \quad (j=1, 2), \quad (10)$$

где $\vartheta_j(s) = \beta(s) + a_j \beta'(s)$; $a_1 = -s$; $a_2 = 1 - s$; $\gamma_j = a_j \sqrt{\beta''(s)}$; $F(\gamma_j) = 1/\sqrt{2\pi} \int_{-\infty}^{\gamma_j} \exp(-x^2/2) dx$ – интеграл ошибок; $H_m(0)$ – значение полинома Эрмита m -го порядка в точке нуль. Коэффициенты c_k – суть полиномы Эрмита от аргумента M , в которых показатели степени заменены на индексы, например: $c_3 = M^{(3)} - 3M^{(1)}$; $c_4 = M^{(4)} - 6M^{(2)} + 3$ и т.д., а величины $M^{(k)}$ вычисляются по формуле

$$M^{(k)} = \frac{\exp[-\vartheta_1(s)]}{[\beta''(s)]^{k/2}} \frac{d^k}{ds^k} \left\{ \exp[\vartheta_1(s)] \right\},$$

т.е. те же выражения, что и приводятся в известных работах [12, 18, 20].

Значение L^* выбирается в соответствии с используемым критерием принятия решений о качестве и надежности поставляемых предприятием ЗЦОКМ АЭС изделий и конструкционных материалов. Целесообразность выбора того или иного критерия зависит от наличия априорной информации о контролируемой партии изделий, например, сведений о вероятности существования дефектных изделий, рисков решения для показателей безопасности последующих процессов и др. Для учета таких рисков в нашем случае экспертизы качества продукции замкнутого цикла обращения с конструкционными материалами атомных станций ограничимся рассмотрением только критериев Байеса, Неймана-Пирсона и минимаксного [12, 18, 20]. Их использование подразумевает знание в различном объеме априорной диагностической информации об изделиях поставляемых предприятием ЗЦОКМ АЭС. Операции при вычислении порогового значения и ошибок экспертизы качества этих изделий на разных периодах серийного производства могут быть приняты по рекомендациям [21] и для различных статистических критериев заключаются в следующем:

- 1) определение функции $\beta(s)$ по формуле (6) с предварительным расчетом элементов соответствующих матриц \mathbf{R} , \mathbf{T} и др.;
- 2) вычисление параметра s^* из уравнения, вид которого определяется используемым статистическим критерием (табл. 1);
- 3) определение порогового значения отношения правдоподобия $\ln L^* = \beta'(s^*)$;
- 4) определение ошибок экспертизы качества продукции ЗЦОКМ АЭС на этапе их изготовления α_1 и α_2 по формулам (8) или (10) в зависимости от закона распределения информативных параметров при значении параметра $s = s^*$ и среднего риска обнаружения дефектов при экспертизе качества согласно таблицы о правилах разбраковки в формате технологического контроля. В таком варианте исходные данные получают на основе анализа статистической информации о результатах выходного

контроля качества промышленных изделий ЗЦОКМ АЭС и полученных рекламаций на эти изделия. При отсутствии статистически значимой информации об перечисленных выше показателях качества изделий ЗЦОКМ АЭС можно применить критерий Неймана – Пирсона. В этом случае s^* определяют из условия ограничения вероятности ошибки первого рода заданной величиной α_1^* .

Таблица 1

Порядок определения порогового значения в правиле браковки и среднего риска экспертизы качества продукции на предприятиях ЗЦОКМ АЭС при использовании различных критериев

Критерий	Априорные данные	Уравнение для расчета s^*	$\ln L^*$	Средний риск экспертизы качества продукции
Байеса	$S_0; S_1; p_0; p_1$	$\beta'(s^*) = \ln\left(\frac{S_0 p_1}{S_1 p_0}\right)$	$\ln\left(\frac{S_0 p_1}{S_1 p_0}\right)$	$\alpha_1(s^*) S_0 p_1 + \alpha_2(s^*) S_1 p_0$
Минимаксный	$S_0; S_1$	$S_0 \alpha_1(s^*) = S_1 \alpha_2(s^*)$	$\beta'(s^*)$	$\frac{S_0 S_1 \left\{ \alpha_1(s^*) \exp[\beta'(s^*)] + \alpha_2(s^*) \right\}}{S_0 + S_1 \exp[\beta'(s^*)]}$
Неймана – Пирсона	–	$\alpha_1(s^*) = \alpha^*$	$\beta'(s^*)$	–

$p_0; p_1$ – априорные вероятности присутствия в аттестуемой серии годных и негодных изделий; $S_0; S_1$ – стоимости потерь от ошибок технологического контроля 1-го и 2-го рода (совокупная цена отбраковки годного (стоимость производственных потерь) и цена ответственности за выпуск негодного изделия в эксплуатацию.

Заключение

К основным отличительным чертам предлагаемого метода экспертизы и диагностического контроля качества специфической продукции оригинальных производств по утилизации демонтированных конструктивных элементов атомных станций в период их вывода из эксплуатации с позиций перспективной инновации физико-технологического профиля можно отнести следующие.

Доказательство справедливости утверждения о том, что многопараметрический выходной контроль надежности и безопасности продукции серийных предприятий ЗЦОКМ АЭС важен при принятии соответствующего инженерно-технического и финансово-управленческого решения о возможности полномасштабной реализации замкнутого цикла обращения конструкционных материалов ЯЭУ в текущий период и на перспективу развития атомной энергетики.

Значительный технико-экономический эффект от реализации замкнутого цикла обращения конструкционных материалов ЯЭУ уменьшает вероятность финансовых и иных возможных материальных потерь, уже на этапе масштабной реализации рассматриваемой инновации снижает риск нерационального использования людских и природных ресурсов страны.

Предложен метод реализации процедуры экспертизы и диагностического контроля качества специфической продукции оригинальных производств по утилизации демонтированных конструктивных элементов атомных станций и соответствующие интегро-дифференциальные параметры для оценивания различных аспектов качества инноваций в этой сфере деятельности. Значимость этих параметров, необходимая для количественных оценок эффективности и приемлемости инновационных технических решений, существенная в аспектах развития индустриальных способов вывода из эксплуатации АЭС по моделям ЗЦОКМ АЭС.

Таким образом, предложенное выше научно-методическое обеспечение процедуры экспертизы качества продукции замкнутого цикла обращения с конструкционными материалами атомных станций позволяет осуществить все этапы экспертного анализа перспективы и рисков применения моделей ЗЦОКМ АЭС. Затем получить достаточно обоснованные результаты экспертизы качества инновационных технических решений для будущего массового вывода из эксплуатации АЭС и ликвидации их вредного ядерного наследия. Эти результаты крайне необходимы для принятия рациональных финансово-управленческих и организационно-технических решений в различных отраслях национальной экономики страны в целях практической реализации интеллектуально-креативных резервов. Вместе с этим для условий реального производства предложенный метод экспертизы качества позволяет выбрать оптимальную по физико-технологическим и экономическим критериям процедуру выходного контроля продукции серийных предприятий ЗЦОКМ АЭС, которая обеспечивает минимум

вероятности пропуска брака при минимальной стоимости контроля качества серийных изделий и продукции. Кроме того, метод позволяет в практической деятельности оценить вероятности ошибок метрологического контроля качества приборов мониторинга технического состояния и автоматики комплексного технологического процесса по утилизации демонтированных конструктивных компонентов АЭС.

Список литературы

1. Сафонова Н. Н. Научно-методические подходы вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС на промышленной основе // Ядерная и радиационная безопасность. 2025. № 1 (115). С. 41–51. doi: 10.26277/SECNRS.2025.115.1.001
2. Семченков Ю. М., Былкин Б. К., Зверков Ю. А. [и др.]. Особенности опыта организации и выполнения работ по выводу из эксплуатации блоков АЭС за рубежом: анализ, выводы и рекомендации // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика ядерных реакторов. 2022. Вып. 5. С. 124–136.
3. Блинова И. В., Соколова И. Д. Состояние работ по выводу АЭС из эксплуатации (обзор) // Атомная техника за рубежом. 2017. № 5. С. 3–18.
4. Сидоренко В. А. Водоводяные энергетические реакторы. Начало и результат. М. : НТЦ ЯРБ, 2018. 152 с.
5. Прокуряков К. Н. Ядерные энергетические установки. М. : Изд. дом МЭИ, 2015. 446 с.
6. Былкин Б. К., Енговатов И. А. Вывод из эксплуатации реакторных установок : монография. М. : МГСУ, 2014. 228 с.
7. Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Иванов А. Ю. [и др.]. Лучшие зарубежные практики вывода из эксплуатации ядерных установок и реабилитации загрязненных территорий. М. : Комтехпринт, 2017. Т. 1. 336 с.
8. Nuclaer Decommissioning: Planning, Execution and International Experience / ed. by Michele Laraia // IAEA, Woodhead Publishing Series in Energy. 2012. № 36.
9. Новиков Г. А., Ташлыков О. Л., Щекlein С. Е. Обеспечение безопасности в области использования атомной энергии : учебник / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Г. А. Новикова. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. 552 с.
10. Прокуряков К. Н., Хвостова М. С. Разработка методов и средств повышения экологической, радиационной и промышленной безопасности АЭС с ВВЭР-1200 // Глобальная ядерная безопасность. 2024. № 14. С. 29–36.
11. Шилова Л. А., Пустовгар А. А. Информационное моделирование закрытие АЭС // Энергетическая политика. 2021. № 2. С. 72–84.
12. Северцев Н. А., Юрков Н. К. Безопасность динамических систем на этапах жизненного цикла : монография. Пенза : Изд-во ПГУ, 2023. 568 с.
13. Васильева С. В., Коновалова О. В., Панкин А. М. [и др.]. Управление рисками энергетических ядерных объектов топливно-энергетического комплекса на основе измерительной диагностики их технического состояния // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 114–122.
14. Файков Д. Ю., Байдаров Д. Ю. Диверсификация производств в атомной отрасли // Экономическое возрождение России. 2020. № 3. С. 96–109.
15. Баранов В. М., Карасевич А. М., Сарычев Г. А. Испытания и контроль качества материалов и конструкций : учеб. пособие. М. : Высш. шк., 2004. 360 с.
16. Родионов В. Я., Козлов В. В., Тутнов И. А. Система качества в ядерном приборостроении // Ядерные измерительно-информационные технологии. 2007. № 2. С. 3–16.
17. Коллакот Р. Диагностика повреждений. М. : Мир, 1989. 518 с.
18. Панкин А. М. Обработка результатов измерений в задачах технической диагностики : учеб. пособие. СПб. : Политех-Пресс, 2022. 202 с.
19. Барзов А. А., Кузнецов А. В., Пузаков В. С., Сысоев Н. Н. Предиктивные мезотехнологии (на примере энергоэкстремальной гидроструйной диагностики функционального качества). М. : МГУ имени М. В. Ломоносова. Физический факультет, 2022. 225 с.
20. Мушик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений : пер с нем. М. : Мир, 1990. 208 с.
21. Баранов В. М., Карасевич А. М., Сарычев Г. А. [и др.]. Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса. М. : Наука, 1999. 360 с.

References

1. Safronova N.N. Scientific and methodological approaches to decommissioning nuclear power plants on an industrial basis. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' = Nuclear and radiation safety*. 2025;(1):41–51. (In Russ.). doi: 10.26277/SECNRS.2025.115.1.001
2. Semchenkov Yu.M., Bylkin B.K., Zverkov Yu.A. et al. Features of the experience of organizing and performing decommissioning of NPP units abroad: analysis, conclusions and recommendations. *Voprosy atomnoy nauki*

- i tekhniki. Ser.: Fizika yadernykh reaktorov = Issues of atomic science and technology. Ser.: Physics of nuclear reactors.* 2022;(5):124–136. (In Russ.)
3. Blinova I.V., Sokolova I.D. The state of work on decommissioning nuclear power plants (review). *Atomnaya tekhnika za rubezhom = Nuclear technology abroad.* 2017;(5):3–18. (In Russ.)
 4. Sidorenko V.A. *Vodovodyanye energeticheskiye reaktory. Nachalo i rezul'tat = Water-water power reactors. The beginning and the result.* Moscow: NTTS YARB, 2018:152. (In Russ.)
 5. Proskuryakov K.N. *Yadernyye energeticheskiye ustanovki = Nuclear power plants.* Moscow: Izd. dom MEI, 2015:446. (In Russ.)
 6. Bylkin B.K., Yengovatov I.A. *Vyvod iz ekspluatatsii reaktornykh ustanovok: monografiya = Decommissioning of reactor installations : a monograph.* Moscow: MGSU, 2014:228. (In Russ.)
 7. Tsebakovskaya N.S., Utkin S.S., Ivanov A.Yu. et al. *Luchshiye zarubezhnyye praktiki vyvoda iz ekspluatatsii yadernykh ustanovok i reabilitatsii zagryaznennykh territoriy = The best foreign practices of decommissioning of nuclear installations and rehabilitation of contaminated territories.* Moscow: Komtekprint, 2017;1:336. (In Russ.)
 8. Laraia Michele (ed.). Nuclaer Decommissioning: Planning, Execution and International Experience. *IAEA, Wood-head Publishing Series in Energy.* 2012;(36).
 9. Novikov G.A., Tashlykov O.L., Shcheklein S.E. *Obespecheniye bezopasnosti v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii: uchebnik = Safety assurance in the field of atomic energy use : textbook.* Yekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2017:552. (In Russ.)
 10. Proskuryakov K.N., Khvostova M.S. Development of methods and means to improve the environmental, radiation and industrial safety of nuclear power plants with VVER-1200. *Global'naya yadernaya bezopasnost' = Global nuclear safety.* 2024;(14):29–36. (In Russ.)
 11. Shilova L.A., Pustovgar A.A. Information modeling of NPP closure. *Energeticheskaya politika = Energy policy.* 2021;(2):72–84. (In Russ.)
 12. Severtsev N.A., Yurkov N.K. *Bezopasnost' dinamicheskikh sistem na etapakh zhiznennogo tsikla: monografiya = Safety of dynamic systems at the stages of the life cycle : monograph.* Penza: Izd-vo PGU, 2023:568. (In Russ.)
 13. Vasil'yeva S.V., Konovalova O.V., Pankin A.M. et al. Risk management of nuclear power facilities of the fuel and energy complex based on measurement diagnostics of their technical condition. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(1):114–122. (In Russ.)
 14. Faykov D.Yu., Baydarov D.Yu. Diversification of production in the nuclear industry. *Ekonomicheskoye vozrozhdeniye Rossii = The economic revival of Russia.* 2020;(3):96–109. (In Russ.)
 15. Baranov V.M., Karasevich A.M., Sarychev G.A. *Ispytaniya i kontrol' kachestva materialov i konstruktsiy: ucheb. posobiye = Testing and quality control of materials and structures : a textbook.* Moscow: Vyssh. shk., 2004:360. (In Russ.)
 16. Rodionov V.Ya., Kozlov V.V., Tutnov I.A. Quality system in nuclear instrumentation. *Yadernyye izmeritel'no-informatsionnyye tekhnologii = Nuclear measurement and information technologies.* 2007;(2):3–16. (In Russ.)
 17. Kollakot R. *Diagnostika povrezhdeniy = Diagnostics of damage.* Moscow: Mir, 1989:518. (In Russ.)
 18. Pankin A.M. *Obrabotka rezul'tatov izmereniy v zadachakh tekhnicheskoy diagnostiki: ucheb. posobiye = Processing of measurement results in the tasks of technical diagnostics : a textbook.* Saint Petersburg: Politekh-Press, 2022:202. (In Russ.)
 19. Barzov A.A., Kuznetsov A.V., Puzakov V.S., Sysoyev N.N. *Prediktivnyye mezotekhnologii (na primere energoekstremal'noy gidrostruynoy diagnostiki funktsional'nogo kachestva) = Predictive mesotechnology (using the example of energy-extreme hydrojet diagnostics of functional quality).* Moscow: MGU imeni M.V. Lomonosova. Fizicheskiy fakul'tet, 2022:225. (In Russ.)
 20. Mushik E., Myuller P. *Metody prinyatiya tekhnicheskikh resheniy: per s nem. = Methods of making technical decisions : translated from German.* Moscow: Mir, 1990:208. (In Russ.)
 21. Baranov V.M., Karasevich A.M., Sarychev G.A. et al. *Akusticheskaya diagnostika i kontrol' na predpriyatiyakh toplivno-energeticheskogo kompleksa = Acoustic diagnostics and control at enterprises of the fuel and energy complex.* Moscow: Nauka, 1999:360. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Сергеевич Григорьев

кандидат технических наук,
начальник отдела,
Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»
(Россия, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1)
E-mail: Grigoriev_AS@nrcki.ru

Aleksandr S. Grigoriev

Candidate of technical sciences, head of department,
National Research Center "Kurchatov Institute"
(1 Akademik Kurchatov square, Moscow, Russia)

Наталия Николаевна Сафонова

кандидат экономических наук,
заместитель генерального директора,
Ассоциация организаций строительного комплекса
атомной отрасли
(Россия, г. Москва, ул. Обручева, 30/1 стр.1)
E-mail: safronova_nn@accni.ru

Natalia N. Safronova

Candidate of economical sciences,
deputy general director,
Association of Nuclear Industry
Construction Organizations
(build.1, 30/1 Obrucheva street, Moscow, Russia)

Игорь Александрович Тутнов

доктор технических наук, профессор,
начальник лаборатории,
Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»
(Россия, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1)
E-mail: Tutnov_IA@nrcki.ru

Igor A. Tutnov

Doctor of technical sciences, professor,
head of laboratory,
National Research Center "Kurchatov Institute"
(1 Akademik Kurchatov square, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 04.04.2025

Поступила после рецензирования/Revised 25.04.2025

Принята к публикации/Accepted 15.05.2025