

УДК 519.254:621.039.4

DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-122-128

## **Определение периодичности неразрушающего контроля металла малодефектного оборудования и трубопроводов атомных станций на основании риск-ориентированного подхода**

Д.А. Кузьмин, М.В. Верташенок, О.С. Толкачев

Выполнено определение периодичности неразрушающего контроля при отсутствии достаточного количества данных об обнаруженных несплошностях для обоснования возможности перевода оборудования и трубопроводов на 10-летнюю периодичность с использованием риск-ориентированного подхода и оптимизации производственных затрат атомной станции. Определение основано на риск-ориентированном подходе, вероятности существования дефектов в оборудовании или трубопроводах с учетом подроста дефекта в процессе эксплуатации, учитывает механику разрушения, теорию вероятностей и математическую статистику. Несплошности представлены в виде трещин, исходя из консервативных предположений. Указанный подход устанавливает периодичность неразрушающего контроля при ограниченном количестве результатов предыдущих контролей (малодефектном оборудовании и трубопроводах) и является развитием методики «Обоснование допустимости изменения объемов и периодичности эксплуатационного неразрушающего контроля металла оборудования и трубопроводов второго контура атомных станций с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200», применяемой АО «Концерн Росэнергоатом». Исходными данными являются эксплуатационные, проектные и результаты неразрушающего контроля.

Разработанный подход позволяет получить распределение остаточной дефектности оборудования и трубопроводов для подсистем АЭС, т. е. функцию вероятности остаточного (пропущенного) после контроля и ремонта дефекта от его размера, что помогает установить вероятность и риск разрушения, периодичность неразрушающего контроля. При разработке обработано более 4000 данных о несплошностях, обнаруженных при неразрушающем контроле, получены коэффициенты распределения остаточной дефектности для оборудования и трубопроводов второго контура АЭС с ВВЭР.

Разработанный подход применим для второго или третьего контуров АЭС с реакторными установками ВВЭР или БН, соответственно.

Подход является развитием методики, разработанной для АЭС, и позволяет оценить периодичность проведения неразрушающего контроля при ограниченном количестве результатов неразрушающего контроля. Приведены примеры расчета для трубопроводов второго контура АЭС с реакторной установкой ВВЭР.

**Ключевые слова:** атомная электрическая станция, неразрушающий контроль, вероятность разрушения, постулируемая дефектность, ограниченное количество результатов неразрушающего контроля.

**Для цитирования:** Кузьмин Д.А., Верташенок М.В., Толкачев О.С. Определение периодичности неразрушающего контроля металла малодефектного оборудования и трубопроводов атомных станций на основании риск-ориентированного подхода // Вестник МЭИ. 2023. № 5. С. 122—128. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-122-128.

## **Determining the Non-Destructive Testing Frequency of the Metal of Slightly Defective NPP Equipment and Pipelines Based on a Risk-oriented Approach**

D.A. Kuz'min, M.V. Vertashenok, O.S. Tolkachev

The frequency of performing non-destructive testing in the absence of sufficient data on detected discontinuities is determined with the aim to justify the possibility of shifting the equipment and pipelines for 10-year intervals between examinations using a risk-oriented approach and optimizing the production costs at a nuclear power plant.

The determination is based on a risk-oriented approach and the probability of flaws to exist in equipment or pipelines, and takes into account the flaw growth during operation, the fracture mechanics, probability theory and mathematical statistics. Discontinuities are represented as cracks proceeding from conservative assumptions. This approach makes it possible to determine the frequency of non-destructive testing when there is a limited number of results of previous examinations (slightly defective equipment and pipelines) and is a further development of the methodology set out in the document “Justification of the Admissibility of Changing the Scopes and Frequency of In-Service Non-Destructive Testing of the Metal of Secondary Circuit Equipment and Pipelines at Nuclear Power Plants with VVER-1000 and VVER-1200 Reactors” applied at Rosenergoatom Concern JSC. Operational data, design data and non-destructive testing results serve as initial data for the approach.

By using the developed approach, it is possible to obtain the distribution of residual flaws of equipment and pipelines for NPP subsystems, i.e., the probability of a residual (missed) flaw after inspection and repair as a function of its size, which helps determine the probability

and risk of failure and the non-destructive testing frequency. In developing the approach, more than 4000 data on discontinuities detected during non-destructive testing were processed, and residual flaw distribution coefficients for the secondary circuit equipment and pipelines at NPPs with VVER reactors were obtained.

The developed approach can be applied for the secondary or tertiary third circuit of NPPs with VVER or fast reactors, respectively. The approach is a further development of the methodology developed for NPPs, and opens the possibility to evaluate the non-destructive testing frequency when there is a limited amount of non-destructive testing results. Calculation examples for the secondary circuit pipelines of the NPP with a VVER reactor are given.

**Key words:** nuclear power plant, non-destructive testing, fracture probability, postulated flaws, limited number of non-destructive testing results.

*For citation:* Kuz'min D.A., Vertashenok M.V., Tolkachev O.S. Determining the Non-Destructive Testing Frequency of the Metal of Slightly Defective NPP Equipment and Pipelines Based on a Risk-oriented Approach. Bulletin of MPEI. 2023;5:122—128. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-122-128.

## Введение

Объем и периодичность эксплуатационного контроля за состоянием основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей (далее — металла) оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций в соответствии с Федеральными нормами [1] установлены в рабочих программах проведения в соответствии с типовыми программами и учетом результатов предыдущего контроля.

Изменения перечня зон контроля и сочетания методов, определенных типовыми программами, а также периодичность проведения эксплуатационного неразрушающего контроля в пределах, описанных документом [1], обосновывается на основе опыта эксплуатации и применения риск-ориентированного подхода в соответствии с методикой [2].

Величина риска разрушения  $i$ -й зоны контроля оборудования и трубопроводов в течение  $j$ -го года эксплуатации  $R_{ij}$  оценивается как произведение вероятности разрушения  $i$ -й зоны контроля в течение  $j$ -го года эксплуатации и последствий этого разрушения [1]:

$$R_{ij} = P_{F_{ij}} C_i \quad (1)$$

где  $P_{F_{ij}}$  — вероятность разрушения  $i$ -й зоны контроля в течение  $j$ -го года эксплуатации;  $C_i$  — последствия разрушения  $i$ -й зоны контроля.

Вероятность разрушения зоны контроля оборудования или трубопроводов атомных станций оценивают на основании функции постулируемой дефектности. Постулируемая дефектность — характеристика дефектов структуры металла оборудования и трубопроводов, остающихся в конструкции после неразрушающего контроля и ремонта выявленных дефектов. Она характеризует существование в металле дефектов с некоторой вероятностью в зависимости от их размеров.

В научной литературе отмечено значительное число публикаций, направленных на решение проблем прочности и ресурса с использованием вероятностных подходов и посвященных оценке вероятности разрушения конструкционных объектов в различных отраслях промышленности, например, оценке вероятности отказа и вероятности разрушения магистральных трубопроводов, а также приведены компьютерные коды для рас-

чета вероятности обнаружения дефектов и расчета вероятности разрушения трубопроводов [3 — 7]. Найдены обзоры — статистических методов оценки вероятности обнаружения дефектов [8 — 9], теории и технологии обеспечения прочности технических объектов [10].

На АЭС за 15 лет эксплуатации 17 блоков с реакторными установками типа ВВЭР (в общей сложности — 135 лет общей эксплуатации оборудования) имеется оборудование и трубопроводы, на которых обнаруживается не более трех несплошностей (дефектов) за весь период эксплуатации. Возникает необходимость разработки подхода для определения величины функции распределения постулируемой дефектности оборудования и трубопроводов атомных станций при ограниченном количестве результатов неразрушающего контроля (малодефектных) или их отсутствии (бездефектных).

## Описание методики

Методика основана на риск-ориентированном подходе и позволяет определить объем и периодичность проведения неразрушающего контроля металла. При расчете вероятности разрушения РР использованы следующие исходные данные:

- результаты неразрушающего контроля металла оборудования и трубопроводов;
- данные напряженно-деформированного состояния в контролируемых зонах контроля для основных режимов эксплуатации;
- сведения о количестве циклов нагружения для основных режимов эксплуатации.

## Определение постулируемой дефектности

С учетом приведенных требований результаты неразрушающего контроля металла представлены в виде гистограммы от размера несплошности  $a$  (под несплошностью консервативно предположим трещиноподобный дефект). Данные гистограммы аппроксимируются на основании известных функций [11 — 14], и полученная зависимость определяет обнаруженную дефектность  $N_{\text{обр}}(a)$ . В качестве размера несплошности  $a$  могут быть использованы: глубина, протяженность, комбинация линейных размеров, площадь или объем дефекта.

Известные способы неразрушающего контроля не гарантируют полного выявления несплошностей [11]. Количественная совокупность оставшихся после контроля и ремонта несплошностей определяется остаточной дефектностью  $N_{\text{ост}}$ . Связь между обнаруженной и остаточной выглядит как

$$N_{\text{ост}}(a) = N_{\text{исх}}(a) - N_{\text{обн}}(a), \quad (2)$$

где  $N_{\text{исх}}(a)$  — функция исходной дефектности, под которой понимается зависимость количества несплошностей, находящихся в материале для  $0 \leq a \leq a_{\max}$ , от их размера, которая может быть оценена на основе анализа несплошностей на заводе-изготовителе во взаимосвязи с конкретной технологией и прямыми экспериментальными исследованиями выявляемости дефектов на тест-образцах.

Исходную дефектность обычно описывают степенным законом распределения  $Aa^{-n}$ , исходя из того, что число несплошностей в конструкции уменьшается с увеличением их размеров [11 — 14].

Функция найденной дефектности в зависимости от размера несплошности  $a$  представлена в виде [12, 13]:

$$N_{\text{обн}}(a) = Aa^{-n}(1 - e^{-\beta(a - a_0)}), \quad (3)$$

где  $A, n$  — коэффициенты распределения, полученные методом аппроксимации;  $\beta$  — консервативный коэффициент, учитывающий влияние человеческого фактора, приборно-методических недостатков или сложности доступа к месту контроля [12, 13],  $\text{мм}^{-1}$ ;  $a_0$  — граничный наименьший размер выявляемой несплошности, зависящий от чувствительности метода контроля.

Уравнение (3) позволяет найти неизвестные постоянные  $A$  и  $n$  по огибающей гистограмме результатов неразрушающего контроля методом аппроксимации.

Коэффициент распределения  $A$  устанавливает масштаб распределения и сокращается при нормировке. Коэффициент  $n$  принимает значения  $[0; \infty)$  и определяет вид функции распределения: чем меньше значение  $n$ , тем большие по размеру несплошности характеризуют зону неразрушающего контроля. Если коэффициент  $n$  больше 25, то в зоне неразрушающего контроля выявлены незначимые для безопасной эксплуатации несплошности [14].

С помощью выражений (2), (3) получен вид функции остаточной дефектности:

$$N_{\text{ост}}(a) = Aa^{-n}e^{-\beta(a - a_0)}. \quad (4)$$

Выражение (4) определяет ненормированный вид дефектности.

Учет нормировки для остаточной дефектности выглядит следующим образом

$$f_{\text{пост}}(a) = KN_{\text{ост}}(a), \quad (5)$$

где  $K$  — коэффициент нормировки,

$$K = 1 \int_{a_0}^{a_{\max}} N_{\text{ост}}(a) da. \quad (6)$$

В настоящей работе количество оставшихся после контроля дефектов и ремонта несплошностей — остаточная дефектность (4) для вероятностных расчетов представлена как постулируемая дефектность (5), т. е. вид постулируемой дефектности зависит от фактических данных по результатам эксплуатации и выражается в вероятностном значении с учетом нормировки (6).

### Определение параметров обнаруженной дефектности при ограниченном количестве результатов неразрушающего контроля

Подход основан на расширении области применения методики для оборудования и трубопроводов с ограниченным количеством результатов неразрушающего контроля (не более трех дефектов). Для таких случаев определить коэффициенты распределения  $A$  и  $n$  уравнения (3) методами аппроксимации с достаточной точностью не представляется возможным.

Для поиска неизвестного коэффициента  $n$  в (3), предполагается, что половина всех потенциально существующих в объекте контроля дефектов имеет размер до среднего размера обнаруженного дефекта  $\mu$ , а оставшаяся половина — после  $\mu$ . Тогда интеграл по функции распределения (3) должен быть равен 0,5 с учетом нормировки (6). Откуда следует

$$F(a) = K \int_{a_0}^{\mu} Aa^{-n} \left(1 - e^{-\beta(a - a_0)}\right) da = 0,5, \quad (7)$$

где  $\mu = \sum_{i=1}^k \frac{a_i}{k}$  — средний размер обнаруженного дефекта;  $a_i$  — размеры обнаруженных несплошностей (дефектов),  $k = 1, 2$  или 3.

В случае, если дефекты в оборудовании и трубопроводе не обнаружены, для построения функции обнаруженной дефектности средний размер обнаруженного дефекта  $\mu$  примем равным наименьшей несплошности, найденной на подобном оборудовании, в соответствии с опытом эксплуатации.

### Учет времени и режимов эксплуатации

Для учета времени эксплуатации используем цикличность нагружения. Определим глубину дефекта  $a_N$ , до которой дорастет обнаруженный дефект  $a_{\text{нac}}$  за известное количество циклов  $N = \sum_{i=1}^n N_i$  в разных  $i$  режимах эксплуатации, используя уравнение Пэриса [12], записанное с учетом асимметрии циклов нагружения:

$$\frac{da}{dN} = \begin{cases} C_0 \left( \frac{\Delta K_1}{\sqrt{1-R}} \right)^m & \text{при } K_{th} < K_1 < K_{fc}; \\ 0 & \text{при } K_1 \leq K_{th}, \end{cases} \quad (8)$$

где  $C_0, m$  — характеристики материала, зависящие от условий нагружения (температуры, рабочей среды, ча-

стоты циклов и т. д.);  $R$  — коэффициент асимметрии цикла нагружения;  $K_{th}$  — пороговое значение коэффициента интенсивности напряжения,  $K_{th} = K_{th}^0(1 - 0,7R)$ , где  $K_{th}^0 = 6,5$  МПа $\sqrt{\text{м}}$  при  $T \leq 450$  °C [13];  $K_{fc}$  — критическое значение коэффициента интенсивности напряжений при циклическом нагружении, определяемое в зависимости от материала. Для большинства сталей  $K_{fc} < K_{th}$  [15].

Положим, что

$$\Delta K_1 = f_k \Delta\sigma \sqrt{\pi a}, \quad (9)$$

где  $f_k$  — корректирующая функция на геометрию и размер трещины, ее место расположения и схему нагружения;  $\Delta\sigma$  — размах напряжений.

Из (4), разделяя переменные и интегрируя левую и правые части уравнения, получим конечную глубину дефекта:

$$a_N = \sqrt[1-\frac{m}{2}]{a_{\text{ нач}}^{1-\frac{m}{2}} + \sum_{i=1}^n N_i C_0 \left( \frac{f_k \Delta\sigma \sqrt{\pi}}{\sqrt{1-R}} \right)^m \left( 1 - \frac{m}{2} \right)}, \quad (10)$$

где  $n$  — количество режимов эксплуатации;  $a_{\text{ нач}}$  — глубина трещины после нагружения;  $i$  — порядковый номер режима нагружения;  $N_i$  — количество циклов нагружения для определённого  $i$ -го режима эксплуатации.

### Определение вероятности разрушения

Для определения вероятности разрушения  $P_F$  используем записанную в интегральной форме теорему о полной вероятности разрушения компонента, содержащего трещиноподобную несплошность, а также допущение о детерминированности приложенных напряжений  $\sigma$ . Запишем выражение для оценки вероятности разрушения после  $N$  циклов нагружения с учетом подрастания трещины от исходной глубины  $a_{\text{ нач}}$  до текущей глубины  $a_N$  [16]:

$$P_{F_N} = \int_{K_{lc \text{ min}}}^{K_{lc \text{ max}}} f_{K_{lc}}(K_{lc}) P(a_N > a_{\text{ крит}}) dK_{lc}, \quad (11)$$

где  $P_{F_N}$  — вероятность разрушения через  $N$  циклов нагружения;  $a_{\text{ крит}}$  — критический размер несплошности.

### Определение последствий разрушения

Последствия разрушения  $C$  компонентов оборудования и трубопроводов определяются на основе вероятностного анализа безопасности первого уровня [17]. Величины последствий выражены в виде вероятностей тяжелой аварии в случае течи и разрыва трубопроводов и паропроводов второго контура в зависимости от их места расположения и граничных условий. Последствия разрушения компонентов оборудования и трубопроводов формируются результатами вероятностного анализа безопасности первого уровня и приведены в методике.

В таблице 1 даны диапазоны оценок вероятности тяжелой аварии в случае течей и разрывов трубопро-

Таблица 1

### Диапазоны последствий (доля от единицы)

Реакторная установка	Величины последствий
ВВЭР-1000	от 5,37E-6 до 2,47E-2
ВВЭР-1200	от 9,4E-8 до 1,1E-5

водов и паропроводов второго контура для ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200.

### Определение риска разрушения

Используя полученное по (11) значение вероятности разрушения и последствия разрушения компонентов оборудования и трубопроводов, найдем риск разрушения по (1) и сравним его по критерию допустимого риска с допустимым значением  $[R]$ :

$$R \leq [R]. \quad (12)$$

Допустимое значение риска из-за течей и разрывов паропроводов и трубопроводов второго контура определяется как вероятность тяжелой аварии и устанавливается на уровне  $[R] = 10^{-8}$  [17]. Допустимое значение риска — величина риска, связанного с разрывами и течами трубопроводов и паропроводов второго контура, вносящего несущественный вклад в общий риск эксплуатации блока АЭС с ВВЭР.

Установим предельно допустимое значение увеличения риска, связанного с увеличением частоты течей и разрывов паропроводов и трубопроводов второго контура из-за изменения программы эксплуатационного контроля, которое выглядит как допустимое увеличение вероятности тяжелой аварии:

$$\Delta R \leq [\Delta R], \quad (13)$$

где  $[\Delta R] = 10^{-9}$  [17].

### Определение допустимой периодичности контроля

Для установления периодичности контроля необходимо сравнить полученные значения риска разрушения с допустимыми значениями:

$$\begin{cases} t \leq 10 \text{ лет}; \\ R(t) \leq 10^{-8}; \\ \Delta R \leq 10^{-9}, \end{cases} \quad (14)$$

где  $t$  — максимальное значение периодичности эксплуатационного неразрушающего контроля зон оборудования, трубопроводов и других элементов АЭС, не более 10 лет [1];  $R(t)$  — риск разрушения, не должен превышать  $10^{-8}$  [17];  $\Delta R$  — изменение риска, не должно превышать  $10^{-9}$  [17].

### Примеры определения периодичности неразрушающего контроля

Для поиска вероятности разрушения и риска при ограниченном количестве результатов неразрушающего контроля по (7) найдем неизвестный коэффициент  $n$ . Консервативный коэффициент  $\beta$  при выявлении 70% несплошностей от общего количества размером  $a_0 < a < a_{\max}$  устанавливается выражением  $\beta = 3,2/(a_{\max} - a_0)$ , где  $a_{\max}$  — максимально возможный размер несплошности. Коэффициент  $A$  сокращается вследствие нормировки.

Рассмотрим в качестве примера перевод трубопроводов питательной воды и трубопроводов основного конденсата с 6-ти на 10-летнюю периодичность неразрушающего контроля металла.

На основании результатов неразрушающего контроля металла и (6) — (14) рассчитаны вероятности и риски разрушения для различных периодов эксплуатации. Результаты представлены в табл. 2.

Для примеров выбраны следующие подсистемы:

- напорные трубопроводы аварийного питательного насоса (площадь обнаруженной несплошности — 169  $\text{мм}^2$ );
- напорный трубопровод вспомогательного питательного электронасоса (площадь обнаруженной несплошности — 2,25  $\text{мм}^2$ );
- трубопровод основного конденсата от подогревателя низкого давления 1 до подогревателя низкого давления 4 (площадь обнаруженной несплошности — 81  $\text{мм}^2$ ).

Исходя из результатов расчетов табл. 2:

- для первого и третьего случаев перевод на 10-летнюю периодичность невозможен, необходимо оставить прежнюю периодичность (согласно [1], — 6 лет);
- для второго случая допустимо изменение периодичности неразрушающего контроля металла на 10 лет.

Из полученных результатов следует, что чем больше коэффициент распределения  $n$ , тем на большую периодичность неразрушающего контроля металла можно допустить оборудование и трубопроводы.

По представленной методике, основанной на рискоориентированном подходе, проведены вычисления для 135-ти подсистем оборудования и трубопроводов

второго контура АЭС с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200. Установлено, что изменение периодичности, более установленной правилами [1] (6 лет), возможно для 54,6% от рассматриваемых подсистем оборудования и трубопроводов второго контура АЭС с ВВЭР-1000, а для ВВЭР-1200 — 84,2%.

### Выводы

Разработанный подход по развитию методики обоснования допустимости изменения объемов и периодичности эксплуатационного неразрушающего контроля металла оборудования и трубопроводов второго контура атомных станций с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 позволяет находить параметры функции поступающей (остаточной) дефектности при ограниченном количестве результатов неразрушающего контроля для проведения расчетов вероятности и риска разрушения конструкционных элементов и определения допустимой периодичности контроля.

По методике с использованием разработанного подхода найдена допустимость увеличения периодичности контроля для более 135-ти подсистем оборудования и трубопроводов второго контура АЭС с ВВЭР, используя более 4000 данных об обнаруженных несплошностях при неразрушающем контроле металла, собранных за 15 лет эксплуатации АЭС с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200.

Даны примеры расчета вероятности и риска разрушения и определена допустимость изменения с 6-ти на 10-летнюю периодичность трех подсистем трубопроводов второго контура АЭС с ВВЭР с применением подхода для определения параметров функции распределения обнаруженной дефектности при ограниченном количестве результатов неразрушающего контроля.

Методика позволяет проводить расчеты по оптимизации с поиском оптимального решения для программы эксплуатации трубопроводных систем, что уменьшает время проведения и затраты среднегодового планово-предупредительного ремонта, а также увеличивает коэффициент использования установленной мощности атомных станций.

Таблица 2

#### Вероятность и риск разрушения для подсистем второго контура АЭС с ВВЭР

Номер случая	$n$	$P_{F_N}$ (через 10 лет)	$R$ (через 10 лет)	$\Delta R$	Вывод
1	1,811	7,46E-05	2,13E-08	9E-10	Недопустимо изменение периодичности по критерию $R(t) \leq 10^{-8}$
2	2,509	1,27E-07	3,63E-11	3,3E-12	Допустим перевод на 10 лет
3	1,970	1,72E-04	2,72E-09	1,69E-09	Недопустимо изменение периодичности на 10 лет по $\Delta R \leq 10^{-9}$

## Л и т е р а т у р а

1. **НП-084-15.** Правила контроля основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей при эксплуатации оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций.
2. **МТ 1.1.4.02.001.1803—2021.** Обоснование допустимости изменения объемов и периодичности эксплуатационного неразрушающего контроля металла оборудования и трубопроводов второго контура атомных станций с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200. М.: АО «Концерн Росэнергоатом», 2021.
3. **Witek M.** Pipeline Failure Probability Evaluation Based on In-line Inspection // Pipeline Technol. J. 2018. V. 3. Pp. 16—21.
4. **Неганов Д.А., Варшицкий В.М., Белкин А.А., Фигаров Э.Н.** Оценка вероятности разрушения участка магистрального нефтепровода по данным внутритрубной диагностики // Нефтяное хозяйство. 2022. № 5. С. 108—112.
5. **Subair Syed Akbar Ali M., Rajagopal P.** Probability of Detection (PoD) Curves Based on Weibull Statistics // J. Nondestructive Evaluation. 2018. V. 37(2). P. 20.
6. **Alexandrov A. E., Azhder T.B., Bunina L.V., Bikovsky S.S.** Computer Program for Calculating Pipelines Destruction Probability // Proc. conf. Data Sci. and Intelligent Systems. 2021. V. 2. Pp. 718—733.
7. **Li M., Spencer F.W., Meeker W.Q.** Quantile Probability of Detection: Distinguishing between Uncertainty Variability in Nondestructive Testing // Material Evaluation. 2012. V. 73(1). Pp. 89—95.
8. **Чертищев В.Ю., Далин М.А., Бойчук А.С., Краснов И.С.** Обзор статистических методов оценки вероятности обнаружения дефектов при неразрушающем контроле // В мире неразрушающего контроля. 2021. № 2(92) Т. 24. С. 4—14.
9. **Yew-Meng Koh, Meeker W.Q.** Quantile POD for Nondestructive Evaluation with Hit-miss Data // Research in Nondestructive Evaluation. 2017. V. 30(2). Pp. 89—111.
10. **Гетман А.Ф.** Теории и технологии обеспечения прочности технических объектов. М.: Нестор—История, 2019.
11. **Кузьмин Д.А., Кузьмичевский А.Ю., Верташенок М.В.** Остаточная дефектность и вероятность существования дефектов с размером, превышающим допускаемое значение // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 5. С. 414—423.
12. **Кузьмин Д.А.** Метод определения надежности оборудования с трещиной в различных режимах эксплуатации // Тяжелое машиностроение. 2021. №4. С. 20—25.
13. **Кузьмин Д.А., Верташенок М.В.** Вероятность существования дефектов, приводящих к разрушению сосуда давления без возникновения течи // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 2. С. 199—213.

## Re f e r e n c e s

1. **NP-084-15.** Pravila Kontrolyya Osnovnogo Metalla, Svarnykh Soedineniy i Naplavlennykh Poverkhnostey pri Ekspluatatsii Oborudovaniya, Truboprovodov i Drugikh Elementov Atomnykh Stantsiy. (in Russian).
2. **МТ 1.1.4.02.001.1803—2021.** Obosnovanie Dopus-timosti Izmeneniya Ob'emov i Periodichnosti Ekspluatatsionnogo Nerazrushayushchego Kontrolya Metalla Obo-rudovaniya i Truboprovodov Vtorogo Kontura Atomnykh Stantsiy S VVER-1000 I VVER-1200. M.: AO «Kontsern Rosenergoatom», 2021. (in Russian).
3. **Witek M.** Pipeline Failure Probability Evaluation Based on In-line Inspection. Pipeline Technol. J. 2018;3: 16—21.
4. **Neganov D.A., Varshitskiy V.M., Belkin A.A., Figarov E.N.** Otsenka Veroyatnosti Razrusheniya Uchastka Magistral'nogo Nefteprovoda po Dannym Vnutritrubnoy Diagnostiki. Neftyanoe Khozyaystvo. 2022;5:108—112. (in Russian).
5. **Subair Syed Akbar Ali M., Rajagopal P.** Probability of Detection (PoD) Curves Based on Weibull Statistics. J. Nondestructive Evaluation. 2018;37(2):20.
6. **Alexandrov A. E., Azhder T.B., Bunina L.V., Bikovsky S.S.** Computer Program for Calculating Pipelines Destruction Probability. Proc. conf. Data Sci. and Intelligent Systems. 2021;2:718—733.
7. **Li M., Spencer F.W., Meeker W.Q.** Quantile Probability of Detection: Distinguishing between Uncertainty Variability in Nondestructive Testing. Material Evaluation. 2012;73(1):89—95.
8. **Chertishchev V.Yu., Dalin M.A., Boychuk A.S., Krasnov I.S.** Obzor Statisticheskikh Metodov Otsenki Veroyatnosti Obnaruzheniya Defektov pri Nerazrushayushchem Kontrole. V Mire Nerazrushayushchego Kontrolya. 2021;2(92):24:4—14. (in Russian).
9. **Yew-Meng Koh, Meeker W.Q.** Quantile POD for Nondestructive Evaluation with Hit-miss Data. Research in Nondestructive Evaluation. 2017;30(2):89—111.
10. **Getman A.F.** Teorii i Tekhnologii Obespecheniya Prochnosti Tekhnicheskikh Ob'ektov. M.: Nestor—Istoriya, 2019. (in Russian).
11. **Kuz'min D.A., Kuz'michevskiy A.Yu., Vertashenok M.V.** Ostatochnaya Defektnost' i Veroyatnost' Sushchestvovaniya Defektov s Razmerom, Prevyshayushchim Dopuskaemoe Znachenie. Stroitel'naya Mekhanika Inzhenernykh Konstruktsiy i Sooruzheniy. 2020;16;5: 414—423. (in Russian).
12. **Kuz'min D.A.** Metod Opredeleniya Nadezhnosti Oborudovaniya s Treshchinoy v Razlichnykh Rezhimakh Ekspluatatsii. Tyazheloe Mashinostroenie. 2021;4:20—25. (in Russian).
13. **Kuz'min D.A., Vertashenok M.V.** Veroyatnost' Sushchestvovaniya Defektov, Privodyashchikh k Razrusheniyu Sosuda Davleniya bez Vozniknoveniya Techni. Stroitel'naya Mekhanika Inzhenernykh Konstruktsiy i Sooruzheniy. 2021;17;2:199—213. (in Russian).

14. Кузьмин Д.А. Исследование остаточной дефектности с использованием методов теории вероятностей // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 9. С. 44—49.
15. Троценко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов. Ч. 1. Киев: Наукова думка. 1987.
16. Матвиенко Ю.Г., Кузьмин Д.А., Резников Д.О., Потапов В.В. Оценка вероятности усталостного разрушения конструкционных элементов с учетом статистического разброса механических характеристик прочности материала и остаточной дефектности // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021. № 4. С. 26—36.
17. РБ-101—16. Рекомендации по применению риск-информационного метода при обосновании рисково-информационных решений, связанных с безопасностью блока атомной станции.
14. Kuz'min D.A. Issledovanie Ostatochnoy Defektnosti s Ispol'zovaniem Metodov Teorii Veroyatnostey. Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov. 2021; 87:9:44—49. (in Russian).
15. Troshchenko V.T., Sosnovskiy L.A. Soprotivlenie Ustalosti Metallov i Splavov. Ch. 1. Kiev: Naukova Dumka. 1987. (in Russian).
16. Matvienko Yu.G., Kuz'min D.A., Reznikov D.O., Potapov V.V. Otsenka Veroyatnosti Ustalostnogo Razrusheniya Konstruktsionnykh Elementov s Uchetom Statisticheskogo Razbrosa Mekhanicheskikh Kharakteristik Prochnosti Materiala i Ostatochnoy Defektnosti. Problemy Mashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin. 2021;4:26—36. (in Russian).
17. RB-101—16. Rekomendatsii po Primeneniyu Risk-informativnogo Metoda pri Obosnovanii Risk-informativnykh Resheniy, Svyazannykh s Bezopasnost'yu Bloka Atomnoy Stantsii. (in Russian).

#### **Сведения об авторах:**

**Кузьмин Дмитрий Александрович** — кандидат технических наук, руководитель департамента прочностной надежности оборудования и трубопроводов АЭС Всероссийского научно-исследовательского института по эксплуатации атомных электростанций, e-mail: Kuzmin\_DA@yahoo.com

**Верташенок Марина Владимировна** — аспирант, главный специалист департамента прочностной надежности оборудования и трубопроводов АЭС Всероссийского научно-исследовательского института по эксплуатации атомных электростанций, e-mail: Rodionova\_m@bk.ru

**Толкачев Олег Сергеевич** — аспирант, инженер департамента прочностной надежности оборудования и трубопроводов АЭС Всероссийского научно-исследовательского института по эксплуатации атомных электростанций, e-mail: OSTolkachev@vniiaes.ru

#### **Information about authors:**

**Kuz'min Dmitriy A.** — Ph.D. (Techn.), Head of Strength Reliability of NPP Equipment and Pipelines Dept., All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation, e-mail: Kuzmin\_DA@yahoo.com

**Vertashenok Marina V.** — Ph.D.-student, Chief Specialist of Strength Reliability of NPP Equipment and Pipelines Dept., All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation, e-mail: Rodionova\_m@bk.ru

**Tolkachev Oleg S.** — Ph.D.-student, Engineer of Strength Reliability of NPP Equipment and Pipelines Dept., All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation, e-mail: OSTolkachev@vniiaes.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 28.03.2023

**The article received to the editor:** 28.03.2023

**Статья принята к публикации:** 06.06.2023

**The article has been accepted for publication:** 06.06.2023