

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ EXPERIMENTAL RESEARCHES

DOI 10.22363/1815-5235-2020-16-5-414-423  
УДК 621.039:621.311.22:519.257:519.222:51-74

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

### Остаточная дефектность и вероятность существования дефектов с размером, превышающим допускаемое значение

Д.А. Кузьмин, А.Ю. Кузьмичевский, М.В. Верташенок\*

Вероссийский Научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций, Российская Федерация, Москва, ул. Ферганская, 25

\*rodionova\_m@bk.ru

#### История статьи

Поступила в редакцию: 15 июля 2020 г.  
Доработана: 21 сентября 2020 г.  
Принята к публикации: 27 сентября 2020 г.

#### Аннотация

**Актуальность.** Неразрушающий контроль металла определяет фактическое состояние металла, наличие несплошностей и их размеры, а также позволяет определить каким механизмом деградации металл был подвержен. Одной из основных характеристик качества неразрушающего контроля является выявляемость несплошностей и дефектов. Если дефекты не были пропущены, то можно гарантировать надежную работу объекта до следующего планового контроля. Статья посвящена изучению функции вероятности обнаружения дефектов и определению вероятности существования остаточного дефекта с размером, превышающим допускаемое значение. **Цель** исследования – разработать метод, позволяющий определить вероятность существования остаточного дефекта с размером, превышающим допускаемое значение, после проведения неразрушающего контроля и ремонта оборудования и трубопроводов атомной электрической станции. **Методы.** При проведении работы были использованы формулы вероятности обнаружения дефекта и исходной дефектности, нормативные требования в области аттестации дефектоскопистов, результаты исследований по неразрушающему контролю. **Результаты.** Представлен метод определения вероятности существования дефектов с размером, превышающим допускаемое значение, на примере корпуса реактора. Методика основана на остаточной дефектности, которая учитывает выявляемость дефектов. Установлено значение коэффициента, учитывающего влияние человеческого фактора, приборно-методических недостатков или сложности доступа к месту контроля, что позволяет снизить степень неопределенности при диагностике остаточной дефектности. Результаты проведенной работы позволяют определить вероятность существования дефекта с размером, превышающим допускаемое значение. Развитие остаточного дефекта до критических значений характеризует исходное событие для разрушения целостности конструкции. Таким образом, вероятность остаточного дефекта может использоваться при выполнении анализа безопасности корпуса водо-водяного энергетического реактора.

**Ключевые слова:** атомная станция, корпус реактора, остаточная дефектность, неразрушающий контроль, выявляемость дефектов

#### Для цитирования

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. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-5-414-423>

Кузьмин Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, начальник отдела прочностной надежности АЭС; Scopus iD: 56804728400, eLIBRARY SPIN- код: 3207-3489.

Кузьмичевский Александр Юрьевич, кандидат технических наук, главный эксперт отдела прочностной надежности АЭС; eLIBRARY SPIN-код: 3408-6736.

Верташенок Марина Владимировна, ведущий специалист отдела прочностной надежности АЭС.

© Кузьмин Д.А., Кузьмичевский А.Ю., Верташенок М.В., 2020

 This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## Investigation of the probability of existence of defects with a size exceeding the allowed value

Dmitry A. Kuzmin, Alexander Yu. Kuzmichevsky, Marina V. Vertashenok\*

All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation, 25 Ferganskaya St, Moscow, 109507, Russian Federation

\*rodionova\_m@bk.ru

### Article history

Received: July 15, 2020

Revised: September 21, 2020

Accepted: September 27, 2020

### Abstract

**Relevance.** Non-destructive testing of metal determines the actual state of the metal, the presence of discontinuities and their sizes, and also allows to determine what mechanisms of metal degradation were subjected to. One of the main characteristics of the quality of non-destructive testing is the detectability of discontinuities and defects. If no defects were missed, then it's possible to guarantee the reliable operation of the facility until the next scheduled inspection. The article is devoted to the study of the probability function of detecting defects and determining the probability of the existence of a residual defect with a size exceeding the permissible value. *The aim of the work* – to develop a method to determine the probability of the existence of a residual defect with a size exceeding the permissible value after non-destructive testing and repairs of equipment and pipelines of a nuclear power plant. *Methods.* During the work formulas for the probability of detecting a defect and initial defectiveness, regulatory requirements in the field of certification of flaw detectors, and the results of research on non-destructive testing were used. *Results.* A method for determining the probability of defects with a size exceeding the allowed value, using the example of a reactor vessel, is presented. The method is based on residual defects, which takes into account the detectability of defects. The value of the coefficient that takes into account the influence of the human factor, instrument and methodological shortcomings or complexity of access to the control point is determined, which reduces the degree of uncertainty in determining the residual defect. The results of this work permit to evaluate the probability of the existence of a defect with a size exceeding the allowed value. The development of a residual defect to critical values characterizes the initial event for the destruction of the integrity of the structure. Thus, the probability of a residual defect can be used when performing a safety analysis of the water-water energetic reactor vessel.

**Keywords:** nuclear power plant, reactor vessel, residual defectiveness, non-destructive testing, detectability of defects

### For citation

Kuzmin D.A., Kuzmichevsky A.Yu., Vertashenok M.V. Investigation of the probability of existence of defects with a size exceeding the allowed value. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020;16(5):414–423. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-5-414-423>

## 1. Введение

В металле со временем происходят изменения, влияющие на механические свойства. Эти изменения наиболее вероятны при различных воздействиях, таких как температура, давление, влияние среды, которые неизбежны во время эксплуатации. Для атомной энергетики контроль за состоянием металлических конструкций играет важную роль.

Проведение контроля металла в Российской Федерации регулируется документом [1] и включает в себя контроль состояния металла неразрушающими и разрушающими методами, а также подразделяется на предэксплуатационный, эксплуатационный (периодический) и внеочередной. Контроль состояния металла выполняется неразрушающими и разрушающими методами, но именно неразрушающий контроль позволяет определить фактическое состояние оборудования, не нарушая его целостность. Нередко по результатам проведения неразрушающего контроля обнаруживаются несплошности и дефекты, которые могут привести к авариям. Наиболее устоявшиеся методы неразрушающего контроля для обнаружения и оценки развития дефектов приведены в работах [2–4].

Преимущественно из-за недостатков технологии изготовления в первые годы эксплуатации возникает значительное количество нарушений сплошности металла. Всегда имеется конечная вероятность при

*Dmitry A. Kuzmin*, Candidate of Technical Sciences, Head of the Strength Reliability Division of Nuclear Power Plant; Scopus iD: 56804728400, eLIBRARY SPIN-code: 3207-3489.

*Alexander Yu. Kuzmichevsky*, Candidate of Technical Sciences, chief expert of the Strength Reliability Division of Nuclear Power Plant; eLIBRARY SPIN-code: 3408-6736.

*Marina V. Vertashenok*, leading specialist of the Strength Reliability Division of Nuclear Power Plant.

контроле пропустить дефект, который может повлиять на безопасность. В связи с этим можно утверждать, что после изготовления, контроля и ремонта в конструкциях еще могут оставаться не выявленные дефекты [5]. Совокупность оставшихся после контроля и ремонта дефектов в изделии назовем остаточной дефектностью. Исследования в области оценки безопасности и надежности оборудования с дефектами рассматривались в статьях [6–12].

С точки зрения прочности и ресурса конструкции остаточная дефектность является важнейшей характеристикой материала данной конструкции. Действительно, если пропущенный дефект достигает критических размеров, то происходит разрушение всей конструкции или ее элемента, а так как информация о пропущенном дефекте отсутствует, то разрушение происходит внезапно.

Целью настоящей статьи является исследование остаточной дефектности после проведения неразрушающего контроля корпуса реактора атомной станции с учетом величины выявляемости дефектов. Выявляемость дефектов – это вероятность обнаружения дефектов с заданными характеристиками, которая определена в нормативных документах в размере 70 % от общего количества несплошностей размером, превышающим чувствительность прибора при контроле. В соответствии с опытом эксплуатации принято использовать консервативный подход при рассмотрении результатов неразрушающего контроля, то есть все несплошности представлять в виде трещины как наиболее опасного для эксплуатации вида. Рассчитано значение коэффициента, учитывающего влияние человеческого фактора, приборно-методических недостатков или сложности доступа к месту контроля, что позволяет снизить неопределенность при определении остаточной дефектности. Также определена вероятность существования дефекта с размером, превышающим допустимое значение, то есть дефекта, который может привести к разрушению конструкции.

## 2. Методы

### 2.1. Вероятность обнаружения дефектов

Функция вероятности обнаружения дефектов в зависимости от линейного размера дефекта, например глубины  $a$ , имеет вид [5; 13]

$$F(a) = 1 - e^{-\beta(a-a_0)}, \quad (1)$$

где  $a_0$  – граничный наименьший размер выявляемого дефекта, зависящий от чувствительности метода контроля, мм;  $\beta$  – коэффициент, учитывающий влияние человеческого фактора, приборно-методических недостатков или сложности доступа к месту контроля,  $\text{мм}^{-1}$ .

В качестве линейного размера дефекта также могут быть использованы глубина, протяженность, комбинация линейных размеров, площадь или объем дефекта.

Вероятность обнаружения дефектов при  $a < a_0$  равна нулю, так как при проведении контроля прибор не может определить дефект меньше, чем чувствительность прибора, то есть

$$F(a < a_0) \equiv 0. \quad (2)$$

Зависимость (1) в общем виде имеет вид, представленный на рис. 1, при дефектах с размерами  $a_0 < a < S$ , где  $S$  – толщина стенки.

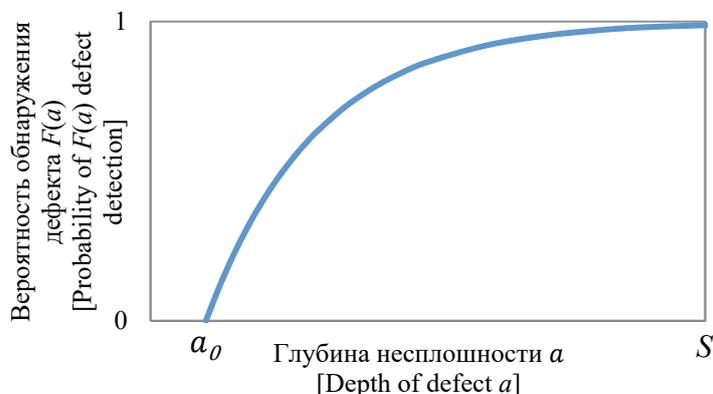


Рис. 1. График функции распределения вероятности обнаружения дефектов от их размера  
[Figure 1. Graph of a distribution function of a probability of detection of defects from their size]

Функция плотности вероятности (1) имеет вид

$$f(a) = \beta e^{-\beta(a-a_0)}. \quad (3)$$

Найти все дефекты с размерами  $a_0 < a < S$  не представляется возможным. Данные экспериментальных исследований по выявляемости дефектов по результатам неразрушающего контроля с использованием тест-образцов представлены в табл. 1 [5]. Из них видно, что выявляемость дефектов при неразрушающем контроле варьируется от 50 до 100 % в зависимости от условий его проведения, таких как метод контроля, размеры заложенных дефектов и квалификации дефектоскопистов. В настоящее время ведется множество исследований, ориентированных на изучение влияния различных факторов на выявляемость дефектов и усовершенствование методов неразрушающего контроля [14–18].

Таблица 1

Результаты исследований по выявляемости дефектов по результатам неразрушающего контроля с использованием тест-образцов  
[Table 1. The results of researches to determine the detection of defects according to the results of non-destructive testing using test samples]

Метод контроля [Control method]	Протяженность дефекта, мм [Defect length, mm]					
	До [Up to] 15	15–20	20–25	25–30	30–35	35–40
Радиография [Radiography]	86 %	100 %	75 %	50 %	100 %	100 %
Автоматический ультразвуковой контроль [Automatic ultrasonic testing]	84 %	75 %	100 %	75 %	100 %	100 %

Согласно нормативному документу РФ [19], Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору установлены требования к количеству обнаруженных дефектов для персонала, выполняющего неразрушающий контроль, в размере 70 % или более от общего количества несплошностей размером более  $a_0$ . Значение 70 % установлено как пороговое для получения положительного решения по аттестации в области неразрушающего контроля. В соответствии с этим найдем значение  $[\beta]$  функции (1), при котором совокупность обнаруженных несплошностей составляет 70 % от общего количества несплошностей в металле:

$$\int_{a_0}^S (1 - e^{-[\beta](a-a_0)}) da = 0,7(S - a_0). \quad (4)$$

Преобразуем уравнение (4):

$$(S - a_0) - \frac{1}{[\beta]} (1 - e^{-[\beta](S-a_0)}) = 0,7(S - a_0). \quad (5)$$

Из уравнения (5) получим

$$[\beta] = \frac{1}{S-a_0} \left( W \left( -\frac{10}{3e^{\frac{10}{3}}} \right) + \frac{10}{3} \right) \approx \frac{3,197}{S-a_0}, \quad (6)$$

где  $W(z)$  –  $W$ -функция Ламберта.

Перепишав выражение (4) в общем виде в зависимости от величины выявляемости дефектов  $P$ , выраженной в долях единицы, можно получить выражение для коэффициента  $\beta$ , учитывающего условия проведения контроля:

$$\beta = \frac{1}{S-a_0} \left( W \left( -\frac{1}{(1-P)} e^{-\frac{1}{(1-P)}} \right) + \frac{1}{(1-P)} \right), \quad (7)$$

где  $S$  – толщина стенки, мм;  $a_0$  – чувствительность метода контроля, мм;  $P$  – выявляемость дефектов, выраженная в долях единицы.

Полученное в (6) значение  $[\beta]$  определяет минимально допустимое значение для обеспечения требования по обнаружению дефектов в размере 70 % или более от общего количества несплошностей размером более  $a_0$ . Далее будет использовано значение  $[\beta] = \frac{3,197}{S-a_0}$ .

Подставив полученное выражение (6) в функцию (3), получаем зависимость функции плотности вероятности обнаружения дефекта от толщины стенки  $S$  и чувствительности измерения  $a_0$ :

$$f_{[\beta]}(a) = \frac{3,197}{S-a_0} e^{-\frac{3,197}{S-a_0}(a-a_0)}. \quad (8)$$

Тогда вероятность обнаружения дефекта определяется следующим образом:

$$F_{[\beta]}(a) = 1 - e^{-\frac{3,197}{S-a_0}(a-a_0)}. \quad (9)$$

Используя значения толщины стенки  $S=150$  мм для корпуса реактора ВВЭР-440 и чувствительность измерения при ультразвуковом контроле  $a_0 = 1$  мм, получаем  $[\beta] \approx 0,021 \text{ мм}^{-1}$  для обеспечения выявления 70 % от общего количества несплошностей в металле.

## 2.2. Количественная оценка обнаруженной дефектности

Число обнаруженных дефектов  $N_{\text{обн}}(a)$  можно представить зависимостью от исходной дефектности  $N_{\text{исх}}(a)$  и от достоверности контроля, которую можно описать функцией вероятности обнаружения дефектов  $F(a)$  [5–7; 20]:

$$N_{\text{обн}}(a) = N_{\text{исх}}(a)F(a). \quad (10)$$

Под исходной дефектностью понимается зависимость количества дефектов, находящихся в материале для  $0 < a < S$ , от их размера.

Функцию  $F(a)$  можно описать уравнением (1), а  $N_{\text{исх}}(a)$  может быть оценена на основе анализа дефектов на заводе-изготовителе во взаимосвязи с конкретной технологией изготовителя и прямыми экспериментальными исследованиями выявляемости дефектов на тест-образцах.

В общем случае допустимо утверждать, что число несплошностей в конструкции уменьшается с увеличением их размеров. Такую зависимость  $N_{\text{исх}}$  от размера дефекта можно описать в виде

$$N_{\text{исх}}(a) = Aa^{-n}, \quad (11)$$

где  $A$  и  $n$  – коэффициенты аппроксимации, которые в общем случае зависят от технологии.

Зависимость (11) подтверждается тем, что несплошности, находящиеся в металле, условно разделяются на три группы в соответствии с их размерами (табл. 2).

Таблица 2

Виды несплошностей в металле

№	Вид несплошности, размер	Причины возникновения	Количество
I	Субмикроскопические, сравнимы с размерами атомов	Дефекты кристаллической решетки	В металле количество очень велико (в сечении $1 \text{ см}^3$ попадает $10^8 \div 10^{12}$ дислокаций)
II	Микроскопические, сравнимы с размерами зерен в металле	Связаны с процессами получения слитка, его обработки давлением, изготовления полуфабриката детали (микропоры, неметаллические включения, микронадрывы и т. п.)	Число микроскопических дефектов существенно меньше субмикроскопических, но все еще велико. На $1 \text{ см}^3$ может быть несколько дефектов
III	Макроскопические	Характерны, как правило, для сварных соединений	Вероятность попадания в эксплуатацию конструкции с макродефектом в основном металле очень мала, но существует

Table 2

Types of discontinuities in metal

No.	Type of discontinuity, size	Causes	Quantity
I	Submicroscopic, comparable to atom sizes	Lattice defects	The quantity in the metal is very large ( $10^8 \div 10^{12}$ dislocations fall in the cross section of $1 \text{ cm}^3$ )
II	Microscopic, comparable to grain sizes in metal	Associated with the processes of obtaining an ingot, its processing by pressure, manufacturing of a semi-finished product (micropores, non-metallic inclusions, micro bursts, etc.)	The number of microscopic defects is significantly less than submicroscopic, but still large. There may be several defects per $1 \text{ cm}^3$
III	Macroscopic	Typical for welded joints	The probability of getting into operation of a structure with a macrodefect in the base metal is very small, but exists

Подставив выражения (11) и (9) в (10), получаем

$$N_{\text{обн},[\beta]}(a) = Aa^{-n} \left( 1 - e^{-\frac{3,197}{S-a_0}(a-a_0)} \right). \quad (12)$$

Уравнение (12) позволяет по зависимости для обнаруженной дефектности, определенной как огибающая гистограммы результатов неразрушающего контроля, определить исходную дефектность. Такая задача сводится к выявлению неизвестных постоянных  $A$ ,  $n$ .

В работе [6] задача по определению обнаруженной дефектности решалась в зависимости от трех переменных  $A$ ,  $n$  и  $\beta$ . Снижение степени неопределенности к двум переменным  $A$  и  $n$  за счет использования условия о величине выявляемости в размере 70 % от общего количества несплошностей и определения  $\beta$ , используемые в настоящем методе, существенно упрощает задачу.

Для исследования результатов по неразрушающему контролю используем данные по дефектности корпуса реактора ВВЭР-440 [20]. Получим функцию зависимости обнаруженной дефектности от глубины дефекта. Исследование результатов неразрушающего контроля применялось при определении фактических толщин стенок оборудования и трубопроводов (ОиТ), подверженных эрозионно-коррозионному износу [9]. Аппроксимация гистограммы представлена на рис. 2.

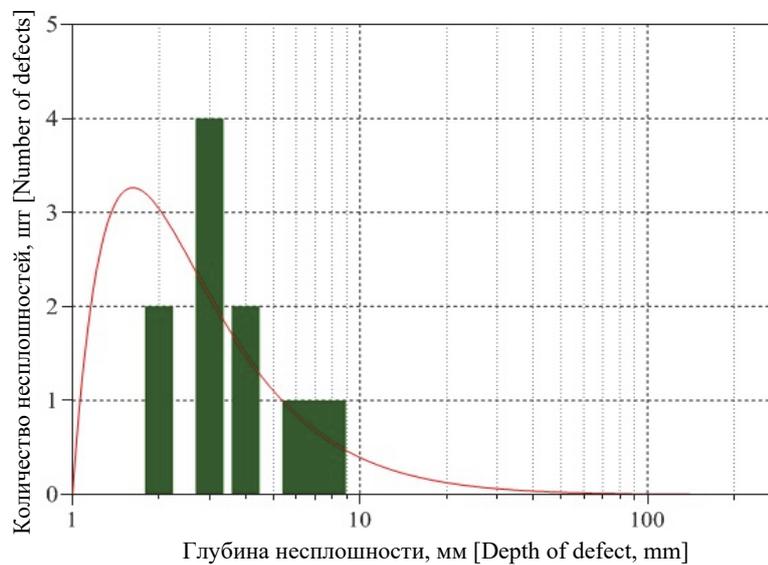


Рис. 2. Функция зависимости обнаруженной дефектности от глубины дефектов  
[Figure 2. The function of the dependence of the detected defect on the depth of defects]

Для корпуса реактора ВВЭР-440, согласно (6),  $[\beta] = 0,021 \text{ мм}^{-1}$ , используя аппроксимацию получаем  $[A] = 877,9 \text{ мм}^{2,585}$  и  $[n] = 2,585$ . Подставив их значения в (12), получаем зависимость количества обнаруженных дефектов  $N_{\text{обн}}$  от размера дефекта  $a$ :

$$N_{\text{обн},[\beta]}(a) = \frac{877,9}{a^{2,585}} \left( 1 - e^{-0,021(a-1)} \right). \quad (13)$$

Полученная функция описывает зависимость обнаруженной дефектности от размера дефекта при условии выявления при контроле 70 % от общего количества несплошностей размером  $a_0 < a < S$  для корпуса реактора ВВЭР-440.

### 2.3. Количественная оценка остаточной дефектности

Все известные способы неразрушающего контроля не обеспечивают полное выявление дефектов, остаются несплошности или дефекты, которые влияют на надежность эксплуатации ОиТ АЭС. Совокупность оставшихся после контроля и ремонта дефектов определяют термином «остаточная дефектность» [2–5; 20].

Остаточную дефектность  $N_{\text{ост}}$  можно определить по формуле

$$N_{\text{ост}}(a) = N_{\text{исх}}(a) - N_{\text{обн}}(a), \quad (14)$$

где  $N_{\text{исх}}(a)$  – функция исходной дефектности.

Подставив выражение (10) в уравнение (14), получим

$$N_{\text{ост}}(a) = N_{\text{исх}}(a) - N_{\text{исх}}(a)F(a) = N_{\text{исх}}(a)(1 - F(a)). \quad (15)$$

Уравнение (15) справедливо для области, где  $F > 0$ . Эта область определяется чувствительностью метода контроля  $a_0$ .

Подставив выражения (1) и (11) в уравнение (15), получим

$$N_{\text{ост}}(a) = \frac{A}{a^n} e^{-\beta(a-a_0)}, \quad (16)$$

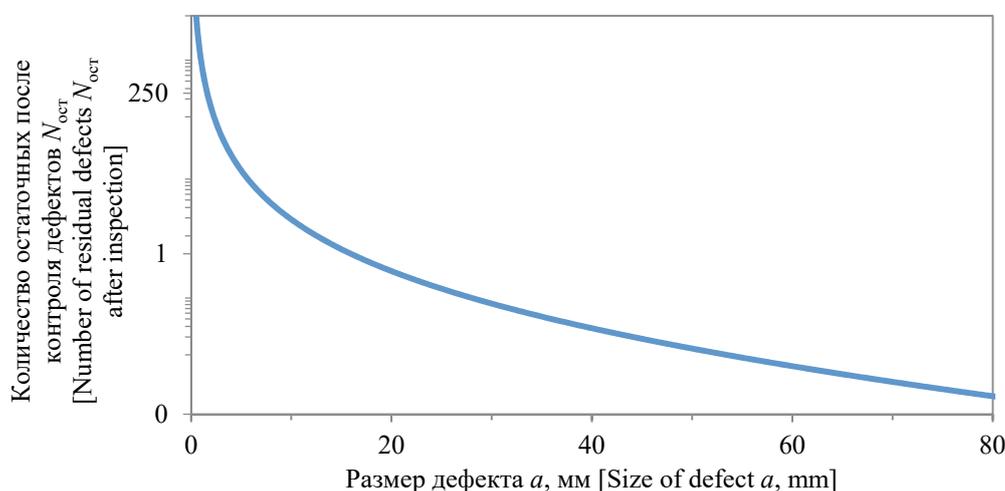
где  $\beta$  в общем виде определяется по формуле (7).

Используя значение  $[\beta]$  для обеспечения выявления 70 % от общего количества несплошностей в металле, получаем

$$N_{\text{ост},[\beta]}(a) = \frac{A}{a^n} e^{-\frac{3,197}{s-a_0}(a-a_0)}. \quad (17)$$

Применяя полученные значения  $[A] = 877,9 \text{ мм}^{2,585}$  и  $[n] = 2,585$  для корпуса реактора ВВЭР-440 и условия выявления 70 % от общего количества несплошностей, получаем

$$N_{\text{ост},[\beta]}(a) = \frac{877,9}{a^{2,585}} e^{-0,021(a-1)}. \quad (18)$$



**Рис. 3.** Функция остаточной дефектности от глубины дефекта (при условии выявления 70 % от общего количества несплошностей в металле)  
**[Figure 3.** The function of residual defectiveness on the depth of discontinuity (provided that 70 % of the total number of discontinuities in the metal be detected)]

Зависимость (18), представленная на рис. 3, показывает, что после проведения контроля и ремонта еще остаются дефекты, поэтому важно, чтобы они не оказались опасными, то есть приводящими к разрушению конструкции. Далее определим вероятность существования дефекта размером более допускаемого значения.

### 3. Результаты исследований

#### 3.1. Исследование вероятности существования дефекта с размером, превышающим допускаемое значение

Определим вероятность нахождения остаточного опасного дефекта, то есть дефекта размером больше допускаемого значения  $[a]$ .

Введем функцию вероятности существования дефекта размером  $a \geq [a]$  следующим образом:

$$P_{[a]}(a \geq [a]) = \frac{\int_{[a]}^S N_{\text{ост}}(a) da}{\int_{a_0}^S N_{\text{ост}}(a) da}. \quad (19)$$

Знаменатель в выражении (19) имеет смысл нормировочного коэффициента.  
Подставив (16) в выражение (19), получаем

$$P_{[a]}(a \geq [a]) = \frac{\int_{[a]}^S \frac{A}{a^n} e^{-\beta(a-a_0)} da}{\int_{a_0}^S \frac{A}{a^n} e^{-\beta(a-a_0)} da} \quad (20)$$

Результаты вычислений в выражении (20) дают формулу определения вероятности остаточного дефекта размером больше допускаемого значения  $[a]$ :

$$P_{[a]}(a \geq [a]) = \frac{\gamma(1-n, S\beta) - \gamma(1-n, [a]\beta)}{\gamma(1-n, S\beta) - \gamma(1-n, a_0\beta)}, \quad (21)$$

где  $\gamma(m, z) = \int_0^z t^{m-1} e^{-t} dt$  – нижняя неполная гамма-функция,  $t > 0$ .

### 3.2. Определение вероятности существования дефекта с размером, превышающим допускаемое значение, на примере корпуса реактора

Используя значения толщины стенки  $S = 150$  мм корпуса реактора ВВЭР-440, чувствительность измерения при ультразвуковом контроле  $a_0 = 1$  мм, условия выявления 70 % от общего количества несплошностей, при котором  $[\beta] = 0,021 \text{ мм}^{-1}$ ,  $[n] = 2,585$ , предположим, что допускаемое значение размера дефекта  $[a] = 0,25S$ , получим

$$P_{[a]}(a \geq 0,25S) = 8,86 \cdot 10^{-4}. \quad (22)$$

Вероятность существования в корпусе реактора ВВЭР-440 дефекта с размером, превышающим допускаемое значение (не более  $0,25S$ ), равна  $8,86 \cdot 10^{-4}$ .

Развитие остаточного дефекта с размером больше допускаемого значения до критических значений может характеризовать исходное событие разрушения целостности оборудования или трубопровода. Поэтому вероятность (22) можно использовать для описания частоты возникновения исходных событий, связанных с результатами неразрушающего контроля, при расчете вероятности разрушения.

## 4. Заключение

Исследована функция вероятности обнаружения дефектов. Используя функцию плотности распределения вероятности обнаружения дефекта и требований надзорного органа в части необходимого объема обнаружения несплошностей, получена зависимость коэффициента  $\beta$ , учитывающего влияние особенностей проведения контроля, от толщины стенки  $S$  и чувствительности прибора при контроле  $a_0$ .

Для корпуса реактора ВВЭР-440 получено значение коэффициента  $[\beta] \approx 0,021$  для обеспечения выявления 70 % от общего количества несплошностей в металле, а также зависимость остаточной дефектности  $N_{\text{ост}}$  от размера дефекта, показывающая, что после проведения контроля и ремонта еще остаются дефекты, поэтому важно, чтобы они не оказались опасными, то есть приводящими к разрушению конструкции.

Разработан метод, позволяющий определить вероятность существования остаточного дефекта с размером, превышающим допускаемое значение, после проведения неразрушающего контроля и ремонта ОиТ АЭС.

Представленный метод позволит сделать выводы о необходимости разработки дополнительных условий качества и контроля металла для обеспечения критериев безопасности, в частности:

- определения требований к аттестации дефектоскопистов;
- допускаемых значений характеристик контроля металла (чувствительности, точности определения размеров дефектов и др.);
- возможных размеров и количества обнаруживаемых дефектов;
- периодичности проведения контроля металла.

## Список литературы

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правила контроля основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей при эксплуатации оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций» (НП-084-15). М., 2016.

2. Wang B., Zhong S., Lee T.L., Fancey K.S., Mi J. Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: a state-of-the-art review // Advances in mechanical engineering. 2020, February. Vol. 12. No 4. Pp. 1–28. DOI: 10.1177/1687814020913761.

3. Santos T.G., Oliveira J.P., Machado M.A., Inácio P.L. Reliability and NDT Methods // Additive Manufacturing Hybrid Processes for Composites Systems. 2020, April. Pp. 265–295. DOI: 10.1007/978-3-030-44522-5\_8.
4. Ravindra Kumar P., Vijay Kumar G., Naga Murali K., Kishore R.B.S.S. Experimental Investigation of Ultrasonic Flaw Defects in Weld Clad Materials Using NDT Technique // Advances in Applied Mechanical Engineering. 2020, January. Pp.1039–1051. DOI: 10.1007/978-981-15-1201-8\_111.
5. Аркадов Г.В., Гетман А.Ф., Родионов А.Н. Надежность оборудования и трубопроводов АЭС и оптимизация их жизненного цикла. М.: Энергоиздат, 2010. 424 с.
6. Кузьмичевский А.Ю., Гетман А.Ф. Определение количественных показателей надежности по критериям разрушения, течи или выявления дефекта в эксплуатации // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. Т. 76. № 10. С. 42–46.
7. Кузьмин Д.А. Исследование условий обеспечения безопасности главного циркуляционного трубопровода на основе концепции ТПП // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2016. № 5. С. 16–23. URL: <http://journals.rudn.ru/structural-mechanics/article/view/14603> (дата обращения: 10.06.2020).
8. Кузьмин Д.А., Матвиенко Ю.Г. Обобщенное уравнение раскрытия сквозной кольцевой трещины в толстостенном плакированном трубопроводе // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 5. С. 41–48.
9. Кузьмин Д.А., Кузьмичевский А.Ю. Определение фактических толщин стенок оборудования и трубопроводов, подверженных эрозивно-коррозионному износу на примере конических переходов // Надежность и безопасность энергетики. 2019. № 12(4). С. 274–280. DOI: 10.24223/1999-5555-2019-12-4-274-280.
10. Pástor M., Frankovský P., Hagara M., Lengvarský P. The Use of Optical Methods in the Analysis of the Areas With Stress Concentration // Journal of Mechanical Engineering. 2018. Vol. 68. No. 2. Pp. 61–76. DOI: 10.2478/scjme-2018-0018.
11. Xiaohui Chen, Shuang Fang, Haofeng Chen. Stress concentration factor and fatigue analysis of a lateral nozzle with local wall thinning // Engineering Failure Analysis. 2019, November. Vol. 105. Pp. 289–304. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.07.004.
12. Маловик К.Н., Мирошниченко А.Н. Совершенствование контроля остаточной дефектности трубопроводов АЭС // Вестник Белорусско-Российского университета. 2015. № 1 (46). С. 79–85. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23174900> (дата обращения: 15.06.2020).
13. Волченко В.Н. Вероятность и достоверность оценки качества металлопродукции. М.: Металлургия, 1987.
14. Shrestha Ranjit, Jeonghak Park, Wontae Kim. Application of thermal wave imaging and phase shifting method for defect detection in stainless steel // Infrared Physics & Technology. 2016, May. Vol. 76. Pp. 676–683. DOI: 10.1016/j.infrared.2016.04.033.
15. Zhengwei Yang, Guangjie Kou, Yin Li, Gan Tian. Inspection Detectability Improvement for Metal Defects Detected by Pulsed Infrared Thermography // Photonic Sensors. 2019, March. No. 9(18). Pp. 1–9. DOI: 10.1007/s13320-019-0489-1.
16. O'Brien N., Mavrogordato M., Boardman R.P., Sinclair I. Comparing cone beam laminographic system trajectories for composite NDT // Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation. 2016, November. Vol. 6. Part B. Pp. 56–61. DOI: 10.1016/j.cnsndt.2016.05.004.
17. Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Повышение достоверности ультразвукового контроля. Ч. 1. Определение типа несплошности при проведении ультразвукового контроля антенными решетками // Контроль. Диагностика. 2015. № 8. С. 7–22. DOI: 10.14489/td.2015.08.pp.007-022.
18. Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Повышение достоверности ультразвукового контроля. Ч. 2. Повышение отношения сигнал/шум // Контроль. Диагностика. 2015. № 9. С. 10–27. DOI: 10.14489/td.2015.09.pp.010-027
19. ПБ 03-440-02. Правила аттестации персонала в области неразрушающего контроля // Серия 28. Неразрушающий контроль. Вып. 3. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2010. 56 с.
20. Гетман А.Ф. Ресурс эксплуатации сосудов и трубопроводов АЭС. М.: Энергоатомиздат, 2000. 427 с.

## References

1. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj energii "Pravila kontrolya osnovnogo metalla, svarnyh soedinenij i naplavlennyh poverhnostej pri ekspluatácii oborudovaniya, truboprovodov i drugih elementov atomnyh stancij" (NP-084-15) [Federal Rules and Regulations in the Field of Nuclear Energy Use "Unified Inspection Procedures for Base Materials, Weld Joints and Build-Ups in the Course of Operation of Equipment, Pipelines and Other Elements of Nuclear Power Plants" (NP-084-15)]. Moscow; 2016. (In Russ.)
2. Wang B., Zhong S., Lee T.L., Fancey K.S., Mi J. Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: a state-of-the-art review. *Advances in mechanical engineering*. 2020;12(4)(February):1–28. DOI: 10.1177/1687814020913761.
3. Santos T.G., Oliveira J.P., Machado M.A., Inácio P.L. Reliability and NDT Methods. *Additive Manufacturing Hybrid Processes for Composites Systems*. 2020;(April):265–295. DOI: 10.1007/978-3-030-44522-5\_8.

4. Ravindra Kumar P., Vijay Kumar G., Naga Murali K., Kishore R.B.S.S. Experimental Investigation of Ultrasonic Flaw Defects in Weld Clad Materials Using NDT Technique. *Advances in Applied Mechanical Engineering*. 2020;(February):1039–1051. DOI: 10.1007/978-981-15-1201-8\_111.
5. Arkadov G.V., Hetman A.F., Rodionov A.N. *Nadezhnost' oborudovaniya i truboprovodov AES i optimizacii ih zhiznennogo cikla (veroyatnostnye metody) [Reliability of NPP equipment and pipelines and optimization of their life cycle (probabilistic methods)]*. Moscow: Energoizdat Publ.; 2010. (In Russ.)
6. Kuzmichevsky A.Y., Getman A.F. Quantification of the reliability using the criteria of failure and leaks or the defect identification in service. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2010;76(10):42–46. (In Russ.)
7. Kuzmin D.A. Investigation of the conditions of safety ensure of the main circulating pipeline on the basis of the LBB concept. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2016;(5):16–23. (In Russ.) Available from: <http://journals.rudn.ru/structural-mechanics/article/view/14603> (accessed: 10.06.2020).
8. Matvienko Y.G., Kuzmin D.A. Generalized equation of the opening of a through-thickness ring crack in a clad thick-wall pipeline. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2018;47(5):420–426. DOI: 10.3103/S1052618818050084.
9. Kuzmin D.A., Kuzmichevskiy A.Y. Determination of actual wall thicknesses of equipment and pipelines exposed to flow-accelerated corrosion on the example of conical reducers. *Safety and Reliability of Power Industry*. 2019;12(4):274–280. DOI: 10.24223/1999-5555-2019-12-4-274-280. (In Russ.)
10. Pástor M., Frankovský P., Hagara M., Lengvarský P. The Use of Optical Methods in the Analysis of the Areas With Stress Concentration. *Journal of Mechanical Engineering*. 2018;68(2):61–76. DOI: 10.2478/scjme-2018-0018.
11. Xiaohui Chen, Shuang Fang, Haofeng Chen. Stress concentration factor and fatigue analysis of a lateral nozzle with local wall thinning. *Engineering Failure Analysis*. 2019;105(November):289–304. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.07.004.
12. Malovik K.N., Miroshnichenko A.N. Improvement of residual defectiveness control of the NPP pipelines. *Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta [Bulletin of the Belarusian-Russian University]*. 2015;1(46):79–85. (In Russ.) Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23174900> (accessed: 15.06.2020).
13. Volchenko V.N. *Veroyatnost' i dostovernost' ocenki kachestva metalloprodukcii [Probability and reliability of metal product quality assessment]*. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1987. (In Russ.)
14. Shrestha Ranjit, Jeonghak Park, Wontae Kim. Application of thermal wave imaging and phase shifting method for defect detection in stainless steel. *Infrared Physics & Technology*. 2016;76(May):676–683. DOI: 10.1016/j.infrared.2016.04.033.
15. Zhengwei Yang, Guangjie Kou, Yin Li, Gan Tian. Inspection Detectability Improvement for Metal Defects Detected by Pulsed Infrared Thermography. *Photonic Sensors*. 2019;9(18)(March):1–9. DOI: 10.1007/s13320-019-0489-1.
16. O'Brien N., Mavrogordato M., Boardman R.P., Sinclair I. Comparing cone beam laminographic system trajectories for composite NDT. *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*. 2016;6(B)(November):56–61. DOI: 10.1016/j.csndt.2016.05.004.
17. Bazulin E.G., Vopilkin A.H., Tihonov D.S. Improved reliability of ultrasonic inspection. Part 1. *Testing. Diagnostics*. 2015;(8):7–22. DOI: 10.14489/td.2015.08.pp.007-022. (In Russ.)
18. Bazulin E.G., Vopilkin A.H., Tihonov D.S. Improved reliability of ultrasonic inspection. Part 2. *Testing. Diagnostics*. 2015;(9):10–27. DOI: 10.14489/td.2015.09.pp.010-027. (In Russ.)
19. PB 03-440-02. Pravila attestacii personala v oblasti nerazrushayushchego kontrolya [PB 03-440-02. Attestation rules for non-destructive inspection personnel]. *Seriya 28. Nerazrushayushchij kontrol' [Series 28. Non-Destructive inspection]* (issue 3). Moscow: STC “Industrial Safety” CJSC; 2010. (In Russ.)
20. Getman A.F. *Resurs ekspluatatsii sosudov i truboprovodov AES [The operational life of vessels and pipelines of NPP]*. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 2000. (In Russ.)