

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ EXPERIMENTAL RESEARCHES

DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-2-199-213

УДК 621.039:621.311.22:519.257:519.222:51-74

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Вероятность существования дефектов, приводящих к разрушению сосуда давления без возникновения течи

Д.А. Кузьмин, М.В. Верташенок*

Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций, Российская Федерация, Москва, ул. Ферганская, д. 25

*rodionova_m@bk.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 25 февраля 2021 г.

Доработана: 10 апреля 2021 г.

Принята к публикации: 17 апреля 2021 г.

Аннотация. *Актуальность.* Для обеспечения безопасности атомной станции на основании требований норм и правил в области использования атомной энергии для трубопроводов первого контура ядерного реактора в проекте должна применяться концепция «течь перед разрушением». Ее основная идея – предотвращение внезапного разрыва трубопроводов контура теплоносителя реактора – состоит в обосновании того факта, что разрыву предшествует образование стабильной сквозной трещины, выявляемой предусмотренными средствами контроля течи. При обосновании концепции предполагается, что «разрушение без течи» – невозможное событие. В статье приводится метод определения вероятности события разрушения без течи. *Цель* – оценить вероятность существования дефекта, который может привести к разрушению сосуда или трубопровода давления без возникновения течи, а также вероятность разрушения без течи за известное количество циклов нагружения. *Методы.* Для систематизации данных, полученных разными методами неразрушающего контроля, использовались консервативные допущения, позволяющие установить площадь обнаруженных дефектов. На основании полученных размеров дефектов вычислялись области размеров дефектов, которые могут определить сценарии подраста трещин. Используя методы математической статистики, определялась вероятность существования дефекта, который может привести к разрушению без течи. На основе методов теории надежности проведено сравнение полученной вероятности разрушения с допускаримым значением. *Результаты.* Разработан метод обработки данных неразрушающего контроля на основе оценки площади обнаруженных дефектов для систематизации данных, полученных разными методами неразрушающего контроля. Определен критерий развития трещин по сценарию «течь перед разрушением». Разработан метод определения вероятности существования дефекта, который может привести к разрушению без течи. Рассмотрен пример расчета на основе трубопроводов питательной воды.

Ключевые слова: атомная электрическая станция, металл, течь перед разрушением, трещина, разрушение без течи, вероятность разрушения, неразрушающий контроль

Для цитирования

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. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-2-199-213>

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

Верташенок Марина Владимировна, главный специалист отдела прочностной надежности АЭС; eLIBRARY SPIN-code: 4576-0036.

© Кузьмин Д.А., Верташенок М.В., 2021



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

The probability of the existence of defects that lead to the destruction of the pressure vessel without leak

Dmitry A. Kuzmin, 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: February 25, 2021

Revised: April 10, 2021

Accepted: April 17, 2021

For citation

Kuzmin D.A., Vertashenok M.V. The probability of the existence of defects that lead to the destruction of the pressure vessel without leak. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021;17(2): 199–213. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-2-199-213>

Abstract. *Relevance.* To ensure the safety of a nuclear power plant on the basis of the requirements of norms and rules in the field of the use of atomic energy for pipelines of the primary circuit of a nuclear reactor, the design should apply the leak before break concept. The main idea of the concept is to prevent a sudden rupture of the pipelines of the reactor coolant loop, and consists in substantiating the fact that the rupture is preceded by the formation of a stable through crack, which is detected by the provided leak control means. When substantiating the concept, it is assumed that “break without leak” is an impossible event. This article provides a method for determining the probability of a failure event without a leak. *Purpose* – estimate the probability of the existence of a defect that can lead to the destruction of the vessel or pressure pipeline without leakage, as well as the probability of failure without leakage for a known number of loading cycles. *Methods.* To systematize the data obtained by different methods of non-destructive testing, conservative assumptions were used to determine the area of detected defects. On the basis of the obtained defect sizes, the defect size regions were determined, which can determine the scenarios of crack growth. Using the methods of mathematical statistics, the probability of the existence of a defect, which can lead to failure without leakage, was determined. Based on the methods of the theory of reliability, a comparison of the obtained probability of destruction with the admissible value is carried out. *Results.* A method for processing non-destructive testing data based on an assessment of the area of detected defects has been developed to systematize the data obtained by different non-destructive testing methods. The criterion for the development of cracks according to the scheme “leak before destruction” is determined. A method has been developed for determining the probability of a defect that can lead to failure without leakage. An example of calculation based on feed water pipelines is considered.

Keywords: nuclear power plant, leak before break concept, crack, probability of destruction, non-destructive testing

Введение

Согласно российским нормам и правилам НП-001–15¹, безопасность атомной станции (АС) – свойство АС обеспечивать надежную защиту персонала, населения и окружающей среды от недопустимого радиационного воздействия. Для сосудов и трубопроводов давления первого контура ядерного реактора критерии ядерной безопасности и безопасности эксплуатации в общетехническом смысле совпадают. Главное свойство, которым эти конструкции должны обладать с позиции как ядерной, так и технической безопасности – это прочность [1]. На пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ существует четыре барьера безопасности для АЭС с реакторной установкой типа ВВЭР: таблетка топлива (первый), герметичная оболочка твэла (второй), корпус реактора с трубопроводами первого контура (третий) и защитная оболочка – контейнмент (четвертый).

В соответствии с НП-001–15 накладываются дополнительные требования к безопасности для трубопроводов первого контура: в проекте АС для контура теплоносителя реактора должна применяться концепция «течь перед разрушением» (ТПР). Объектом концепции ТПР являются элементы конструкций третьего барьера безопасности.

Система безопасности, основанная на концепции ТПР, включает:

- сосуды и трубопроводы давления первого контура;
- теплоноситель, обуславливающий термомеханическое и коррозионное воздействие;

Dmitry A. Kuzmin, Head of Strength Reliability Division of NPP, Ph.D.; eLIBRARY SPIN-code: 3207-3489, Scopus ID: 56804728400.

Marina V. Vertashenok, chief specialist of Strength Reliability Division of NPP; eLIBRARY SPIN-code: 4576-0036.

¹ НП-001–15. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. М.: Ростехнадзор, 2015.

- приборы и технические средства контроля течи и состояния трубопроводов;
- нормативно-техническую документацию, определяющую действия персонала при контроле и обнаружении течи;

– технические средства останова реактора при возникновении течи.

Основная идея концепции ТПР – предупреждение внезапного разрыва сосуда или трубопровода давления.

Концепция ТПР – это совокупность принципов конструирования сосудов и трубопроводов давления, включающая принцип достаточной трещиностойкости материала конструкции; принцип обратной связи, обеспечивающий прекращение эксплуатации конструкции с появлением течи через сквозную трещину, а также принцип достижения приемлемо малой вероятности разрушения конструкции без течи. Практическая реализация перечисленных принципов должна обеспечить условия безопасной эксплуатации сосудов и трубопроводов давления, при которых либо их внезапное полное разрушение исключается полностью, либо вероятность такого события пренебрежимо мала. Данное определение концепции ТПР включает в себя классическое определение, а также содержит принципы, совместная реализация которых позволяет достичь приемлемого уровня надежности и безопасности эксплуатации сосудов и трубопроводов давления [1; 2].

Концепция ТПР оказывает положительное влияние на экономику АЭС, а именно:

а) позволяет избежать установки опор-ограничителей биений концов трубопровода в случае его обрыва;

б) отсутствие опор-ограничителей дает существенное сокращение времени эксплуатационного контроля состояния трубопроводов, так как их присутствие часто усложняет и продлевает работы, связанные с контролем;

в) снижение времени на контроль приводит к снижению доз облучения персонала.

На сегодняшний день применение концепции ТПР основывается на ГОСТ Р 58328–2018², который был разработан на базе руководящих документов в атомной отрасли 1999, 2013 и 2016 гг.³ и утвержден в начале 2019 г. Существует ряд ограничений к применению концепции ТПР:

– наружный диаметр трубопровода не менее 150 мм;

– рабочее давление не ниже 1,9 МПа, а температура не ниже 95 °С;

– значение ударной вязкости металла KVC не менее 80 Дж/см² в исходном состоянии и/или не менее 60 Дж/см² на конец срока оценки.

Современные исследования в области применения концепции ТПР рассматривались в [3–8], по скорости утечки в [9–10].

Расчетное обоснование на применение концепции ТПР для трубопроводов базируется на процедуре, предполагающей постулирование в контрольных зонах трещин начального поверхностного дефекта и сквозной трещины с обнаруживаемой течью. При обосновании концепции ТПР предполагается, что разрушение без течи (РБТ) – невозможное событие. РБТ – это неблагоприятный сценарий, при котором трещина достигает критических размеров, приводящих к разрушению конструкции без стабильного истечения теплоносителя или рабочего тела. При возникновении события РБТ принимается, что разрушение происходит мгновенно по кольцевому сечению (так называемый гильотинный разрыв). Современные исследования приведены в работе [11].

Материалы и методы

Для периодической оценки безопасности атомной станции проводится контроль состояния металла. Целью контроля состояния металла оборудования, трубопроводов и других элементов атомной станции, в соответствии с нормами и правилами в области использования атомной энергии⁴, является:

а) выявление и фиксация несплошностей металла;

б) изменений геометрических размеров;

² ГОСТ Р 58328–2018. Трубопроводы атомных станций. Концепция «течь перед разрушением». М.: Стандартинформ, 2018. 49 с.

³ РД 95 10547–99 (Р-ТПР-01–99). Руководство по применению концепции безопасности «течь перед разрушением» к трубопроводам АЭУ. М.: Минатом, 1999; РД ЭО 1.1.2.05.0939–2013. Руководство по применению концепции безопасности течь перед разрушением к трубопроводам действующих АЭУ. М.: Росэнергоатом, 2013; РД ЭО 1.1.2.05.0939–2016. Концепция безопасности «течь перед разрушением» для контура теплоносителя атомных станций. Руководство. М.: Росэнергоатом, 2016.

⁴ НП-084–15. Правила контроля основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей при эксплуатации оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций. М.: Ростехнадзор, 2015.

- в) изменений механических характеристик и структуры металла;
- г) выявление негерметичности оборудования и трубопроводов (ОиТ);
- д) оценка соответствия состояния металла установленным требованиям.

Контроль состояния металла должен выполняться неразрушающими и разрушающими методами, но именно неразрушающий контроль (НК) позволяет определить фактическое состояние оборудования, не нарушая его целостности.

НК в зависимости от физических явлений, положенных в его основу, в соответствии с российскими нормами и правилами⁴ подразделяется на следующие виды: магнитный, электрический, вихретоковый, радиоволновой, тепловой, оптический, радиационный, акустический, проникающими веществами.

В результате проведения НК получается различная информация об обнаруженных дефектах. Чтобы систематизировать данные, полученные разными методами НК, рассматриваются площади обнаруженных дефектов. В настоящем исследовании будут использоваться результаты радиографического (РК) и ультразвукового (УЗК) контроля, на основе которых можно получить в качестве геометрического размера дефекта площадь с учетом использования методических рекомендаций МР 125-02–95⁵.

В соответствии с опытом эксплуатации и РД ЭО 1.1.2.05.0330–2012⁶, принято использовать консервативный подход при рассмотрении результатов неразрушающего контроля, то есть все имеющиеся в элементах оборудования и трубопроводов несплошности основного металла и материала сварного шва моделируются в виде трещины как наиболее опасном для эксплуатации виде с точки зрения возможности разрушения. Поскольку именно трещина является концентратором напряжений, при эксплуатации она может подрастать за счет циклического нагружения оборудования и трубопровода или механизмов деградации металла.

Трещина представляется эллипсом с малой полуосью, равной $2a$, и большой полуосью, равной $2c$.

В переданных данных по РК представляется следующая информация об обнаруженных дефектах: тип (пора, включение, непровар и др.), длина, ширина или диаметр дефекта.

Метод РК позволяет оценить протяженность и ширину несплошности. Измерить глубину дефекта при помощи данного метода контроля не представляется возможным.

Для получения необходимых данных по площади дефекта были приняты консервативные допущения по значениям глубин несплошностей, приведенные в табл. 1.

На основе полученных значений глубин проводится оценка площадей обнаруженных дефектов. При обработке данных дефект представляется в виде эллипса с длиной l ($l = 2c$), полученной по результатам РК, и глубиной a , определенной по описанным выше консервативным предположениям.

В данных по результатам УЗК представляется информация об обнаруженных дефектах: глубина залегания несплошности, тип (компактный или протяженный), эквивалентная площадь отражателя, положение вдоль оси сварного соединения определяемое по часам, для протяженных – длина протяженности.

Для получения информации о геометрических размерах несплошностей используется протяженность и эквивалентная площадь отражателя, поскольку она характеризует геометрические размеры дефектов (далее – площадь дефекта).

Таблица 1

Допущения по значениям глубин дефектов

№ п/п	Тип дефекта	Допущение
1	Трещинообразные дефекты (трещина, подрез)	Сквозной дефект, поэтому глубина a соответствует толщине стенки S контролируемого объекта
2	Поры, скопления пор	Несплошность имеет сферическую форму, поэтому глубина дефекта a равна ширине (диаметру)
3	Непровар в корне шва	Сквозной дефект, поэтому глубина a соответствует толщине стенки S контролируемого объекта
4	Вогнутость корня шва	Значения глубины a приняты в соответствии с табличными значениями ширины несплошности в соответствии с ПНАЭ Г-10-032–92 ⁷
5	Шлаковые включения	Несплошность имеет сферическую форму, глубина дефекта равна ширине (диаметру)

⁵ МР 125-02–95. Правила составления расчетных схем и определение параметров нагруженности элементов конструкций с выявленными дефектами. М., 1995.

⁶ РД ЭО 1.1.2.05.0330–2012. Руководство по расчету на прочность оборудования и трубопроводов реакторных установок РБМК, ВВЭР и ЭГП на стадии эксплуатации, включая эксплуатацию за пределами проектного срока службы. М.: Росэнергоатом, 2012.

⁷ ПНАЭ Г-10-032–92. Правила контроля сварных соединений элементов локализирующих систем безопасности атомных станций. М.: НТЦ ЯРБ, 2000.

Assumptions on the values of defect depths

No.	Type of defect	Assumption
1	Crack-like defects (crack, undercut)	Through defect, so the depth a corresponds to the wall thickness S of the controlled object
2	Pores, clusters of pores	The discontinuity has a spherical shape, so the depth of the defect a is equal to the width (diameter)
3	Incomplete root penetration	Through defect, so the depth a corresponds to the wall thickness S of the controlled object
4	Concavity of the suture root	The values of the depth a are taken in accordance with the table values of the width of the discontinuity in accordance with PNAE G-10-032–92
5	Slag inclusions	The discontinuity has a spherical shape, the depth of the defect is equal to the width (diameter)

Для обработки результатов УЗК использованы следующие консервативные допущения:

- протяженные дефекты, по которым известны параметры протяженности и площади дефекта, представляются в виде эллипса;
- компактные дефекты, по которым известен только один параметр – площадь дефекта, представляются в виде круга.

Указанные принципы и допущения к обработке результатов неразрушающего контроля позволяют определить необходимые характеристики для систематизации исходных данных, полученных разными методами НК, и формирования функции распределения дефектов по размерам, необходимой для анализа вероятности существования остаточных дефектов.

Результаты и обсуждение

Критерий развития трещин по сценарию «течь перед разрушением»

Дефекты подрастают под воздействием циклических нагрузок, и их подрост может привести к различным результатам. Для упрощения многообразия возможных вариантов роста представим общее направление роста дефектов прямой линией, предполагая, что объект находится в проектных условиях нагружения. На рис. 1 представлена диаграмма размеров дефектов. На диаграмме по осям откладываются глубина и длина трещин. Рост дефекта на рисунке показан стрелкой. Трещина может расти в глубину, тогда появится сквозная трещина, через которую пойдет течь, а может расти в кольцевом направлении, не достигая сквозной глубины. Во втором случае в определенный момент может настать мгновенное разрушение конструкции – разрушение без течи.

Разделим схематично диаграмму размеров дефектов на области, которые могут определить сценарии подроста дефектов (рис. 1). Дефект, находящийся в области I вероятнее всего приведет к сценарию ТПР. Дефект, находящийся в области II, может привести к ТПР, а может – к РБТ. Дефект, находящийся в области III, приведет к РБТ, так как достигнуть глубины, равной толщине стенки, он уже не может. Дефектов в области IV существовать не может, потому что это зона разрушения.

Исходя из вышеописанных соображений, можно получить критерий развития трещин по сценарию ТПР:

$$\frac{da}{dN} \geq \frac{S-a_i}{c_{кр}-c_i} \frac{dc}{dN} \text{ при } c_i \leq c_{кр}, \quad (1)$$

где a_i и c_i – глубина и длина трещины по результатам контроля.

Если критерий выполняется, то рост трещины приведет к ТПР, иначе к РБТ. Случай при $c_i > c_{кр}$ всегда приведет в РБТ. Исходя из консервативных предположений, далее будем рассматривать в качестве области РБТ области дефектов II и III.

Зона IV – это зона разрушения трещин, определяемая по критическим размерам трещин согласно критериям прочности без учета коэффициентов запаса.

Критерий ТПР-РБТ – определяет границу перехода потенциальных (вероятностных) дефектов к различным исходам: ТПР или РБТ. Граница областей ТПР и РБТ, проходящую с точки (c_0, a_0) до точки $(c_{кр}, S)$, описывается видом

$$a = \frac{S-a_0}{c_{кр}-c_0} c + S - \frac{S-a_0}{c_{кр}-c_0} c_{кр}. \quad (2)$$

Для определения критических размеров дефектов в металле оборудования и трубопроводов во время эксплуатации АЭС используются методы, основанные на достижении конструкцией предельного состояния (предела вязкости разрушения или других предельных состояний).

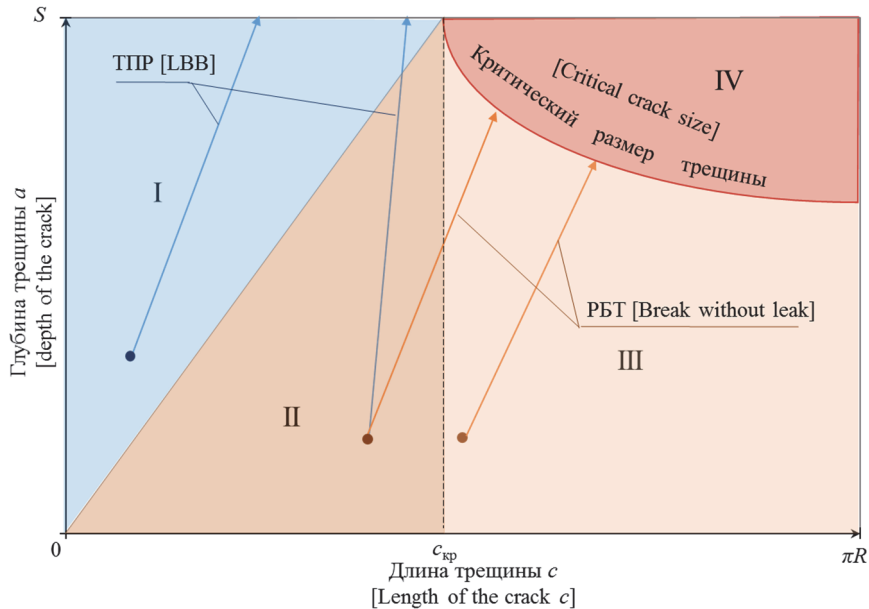


Рис. 1. Области размеров дефектов на диаграмме размеров:

I – рост трещин приведет к ТПР; *II* – рост трещин может привести к ТПР, а может – к РБТ;

III – рост трещин приведет к РБТ; *IV* – разрушение

Figure 1. Defect areas in the defect size chart:

I – crack growth will lead to the LBB; *II* – crack growth can lead to LBB, and maybe to break without leak;

III – crack growth will lead to break without leak; *IV* – break

Трещины могут развиваться в различных направлениях, поэтому для обеспечения применения концепции «течь перед разрушением» возникает необходимость определения вероятности возникновения события РБТ. Для этого необходимо перейти к дефектности и, соответственно, к вероятностной постановке задачи.

Определение вероятности разрушения без возникновения течи

Введем ряд важных определений:

– дефектность – совокупность дефектов в оборудовании или трубопроводе;

– исходная дефектность $N_{исх}$ – содержится в конструкции после изготовления до первого контроля и ремонта;

– обнаруженная дефектность $N_{обн}$ – совокупность дефектов структуры металла, которая была обнаружена в результате неразрушающего контроля;

– остаточная дефектность $N_{ост}$ – содержится в конструкции после контроля и ремонта.

Функцию обнаруженных дефектов $N_{обн}(a)$, с одной стороны, можно построить исходя из результатов неразрушающего контроля, с другой стороны, можно представить произведением функции исходной дефектности $N_{исх}(a)$ на функцию вероятности обнаружения дефектов $F(a, c)$ [12–14]:

$$N_{обн}(a, c) = N_{исх}(a, c) F(a, c), \quad (3)$$

где $F(a, c)$ – функция вероятности обнаружения дефектов в зависимости от размеров трещины глубины a и длины c имеет вид [14–15]

$$F(a, c) = 1 - e^{-\alpha(a-a_0)-\beta(c-c_0)}, \quad (4)$$

где a_0, c_0 – граничные наименьшие размеры выявляемого дефекта, зависящие от чувствительности метода контроля, мм; α, β – коэффициенты, учитывающие влияние человеческого фактора, приборно-методических недостатков или сложности доступа к месту контроля, мм^{-1} .

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

$$N_{\text{ост}}(a, c) = N_{\text{исх}}(a, c) - N_{\text{обн}}(a, c). \quad (5)$$

Под исходной дефектностью понимается зависимость количества дефектов от их размера, находящихся в материале для $0 < a < S$ и $0 < c < L$, где S – толщина стенки, а $L = \pi R$ – полуциркульная длина сечения трубопровода.

Подставляя (3) и (4) в (5), получаем

$$N_{\text{ост}}(a, c) = N_{\text{исх}}(a, c)(1 - F(a, c)). \quad (6)$$

Уравнение (6) справедливо для области, где $F > 0$. Эта область определяется чувствительностью метода контроля.

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

$$N_{\text{исх}}(a, c) = Aa^{-n}c^{-m}, \quad (7)$$

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

Подставив выражения (4) и (6) в (7), получаем

$$N_{\text{ост}}(a, c) = (Aa^{-n}c^{-m}) e^{-\alpha(a-a_0)-\beta(c-c_0)}. \quad (8)$$

Неизвестные постоянные A, B, n и m можно определить по зависимости для обнаруженной дефектности, определенной как огибающая гистограммы результатов неразрушающего контроля.

Введем функцию вероятности существования дефекта размером $a_1 < a < a_2$ и $c_1 < c < c_2$ следующим образом:

$$P(a_1 < a < a_2, c_1 < c < c_2) = \frac{\int_{c_1}^{c_2} \int_{a_1}^{a_2} N_{\text{ост}}(a, c) da dc}{\int_{c_0}^L \int_{a_0}^S N_{\text{ост}}(a, c) da dc}. \quad (9)$$

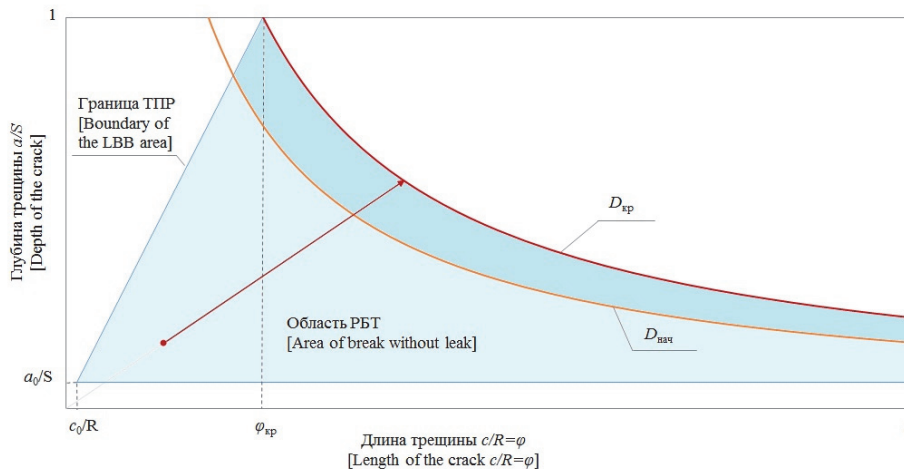


Рис. 2. Область дефектов, которые могут привести к РБТ
 Figure 2. The area of defects that can lead to destruction without leakage

Тогда, чтобы определить вероятность наличия трещин, развивающихся по принципу РБТ, необходимо найти интеграл в числителе выражения (9) по выделенной области на рис. 2 – уточненная область РБТ, определяемая по консервативным соображениям, описанным выше.

То есть вероятность РБТ можно получить по формуле

$$P_{\text{РБТ}}(a, c \in D_{\text{РБТ}}) = \frac{\iint_{a,c \in D_{\text{РБТ}}} N_{\text{ост}}(a,c) da dc}{\int_{c_0}^{\pi R} \int_{a_0}^S N_{\text{исх}}(a,c) da dc}, \quad (10)$$

где $D_{\text{РБТ}}$ – область наличия трещин, развивающихся по принципу РБТ.

Подставляя (8) в (10), получаем формулу для вероятности наличия трещин, которые могут привести к РБТ:

$$P_{\text{РБТ}}(a, c \in D_{\text{РБТ}}) = \frac{\iint_{a,c \in D_{\text{РБТ}}} a^{-n} c^{-m} e^{-\alpha a - \beta c} da dc}{\int_{c_0}^L \int_{a_0}^S a^{-n} c^{-m} e^{-\alpha a - \beta c} da dc}. \quad (11)$$

Найденная по формуле (11) вероятность определяет вероятность наличия трещин в выделенной области на рис. 2. Разделив область $D_{\text{РБТ}}$ для интегрирования и определив границы области, выражение (11) можно записать в виде

$$P_{\text{РБТ}}(a, c \in D_{\text{РБТ}}) = \frac{\int_{c_0}^{c_{\text{кр}}} \int_{a_0}^{f_{\text{ТПР}}(c)} a^{-n} c^{-m} e^{-\alpha a - \beta c} da dc + \int_{c_{\text{кр}}}^L \int_{a_0}^{f_{\text{кр}}(c)} a^{-n} c^{-m} e^{-\alpha a - \beta c} da dc}{\int_{c_0}^{\pi R} \int_{a_0}^S a^{-n} c^{-m} e^{-\alpha a - \beta c} da dc}, \quad (12)$$

где $c_{\text{кр}} = \varphi_{\text{кр}} R$ – критический размер трещины, вычисляемый по различным методикам определения допустимых размеров дефектов в металле (например, по М-02-91⁸); $L = \pi R$ – полуудлина сечения трубопровода; $f_{\text{ТПР}}(c) = \frac{S-a_0}{c_{\text{кр}}-c_0} c + S - \frac{S-a_0}{c_{\text{кр}}-c_0} c_{\text{кр}}$ – граница области ТПР; $f_{\text{кр}}(c) = \frac{S\varphi_{\text{кр}} R}{c}$ – граница области критических размеров.

Расчет вероятности разрушения

Трещины растут при приложении постоянного или изменяющегося во времени нагружения и могут быть развивающимися и неразвивающимися. Прочность материалов при повторно-переменном нагружении во многом зависит от характера изменения напряжений во времени, от периодической нагрузки. Периодическая нагрузка – переменная нагрузка с установившимся во времени характером изменения, значения которой повторяются через определенный промежуток (период) времени.

Рост трещины в условиях реальной эксплуатации может закончиться достижением ею критических размеров, после чего трещина переходит в стадию быстрого неустойчивого развития, которая может вызвать окончательное разрушение конструкции [1].

Для определения безопасной эксплуатации и ресурса необходимо определять критические размеры трещин. Предполагая существование допустимого дефекта в ОиТ, можно определить время безопасного роста трещины до критического значения.

Целью расчета кинетики трещины является определение подраста ее размеров при заданных циклических нагружениях.

Определим количество циклов, за которое трещина может вырасти от начального до критического размера, то есть до размера, при котором наступит РБТ. Для этого необходимо определить начальный размер трещины, направление ее роста и критический размер. Как было показано на рис. 1 трещины могут развиваться в глубину, то есть по направлению сценария ТПР, а могут развиваться по направлению РБТ.

Выберем начальную трещину из области II на рис. 2 с размерами $a_{\text{нач}}$ и $c_{\text{нач}}$. Рассмотрим случай подраста трещины по направлению (например, обозначено стрелкой на рис. 2):

⁸ М-02-91. Методика определения допустимых дефектов в металле оборудования и трубопроводов во время эксплуатации АЭС. М., 1991.

$$\frac{a}{c} = f(\varphi). \quad (13)$$

Найдем количество циклов N_i для отдельного i -го режима нагружения, за которое трещина подрастет от начального до критического размера. Воспользуемся уравнением Пэриса, записанного с учетом асимметрии циклов нагружения,

$$\frac{da}{dN} = \begin{cases} C_0 \left(\frac{\Delta K_I}{\sqrt{1-R}} \right)^m & \text{при } K_{th} < K_I < K_{fC}, \\ 0 & \text{при } K_I \leq K_{th}, \end{cases} \quad (14)$$

где C_0 и m – характеристики материала, зависящие от условий нагружения (температуры, рабочей среды, частоты 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 $K_{th}^0 = 6,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ при $T \leq 450 \text{ }^\circ\text{C}$ ⁹; K_{fC} – критическое значение коэффициента интенсивности напряжений при циклическом нагружении, определяемое в зависимости от материала. Для большинства сталей $K_{fC} < K_{IC}$ [16].

Полагая

$$\Delta K_I = Y \Delta \sigma \sqrt{\pi a}, \quad (15)$$

из выражения (14), разделяя переменные и интегрируя левую и правые части уравнения, учитывая коэффициент запаса на количество циклов n_N , можно для отдельного i -го режима нагружения получить количество циклов, через которое трещина может дорасти до РБТ по заданному направлению (13):

$$N_i = \frac{1}{n_N C_0 \left(\frac{Y \Delta \sigma_i \sqrt{\pi}}{\sqrt{1-R_i}} \right)^m} \frac{a_{кр}^{1-\frac{m}{2}} - a_{нач}^{1-\frac{m}{2}}}{1-\frac{m}{2}}, \quad (16)$$

где Y – геометрический коэффициент, который принимается постоянной величиной; i – порядковый номер режима нагружения; $\Delta \sigma$ – размах напряжений, действующих при i -м режиме нагружения; $a_{кр}$ – глубина трещины после N_i циклов нагружения; N_i – количество циклов нагружения для определенного i -го режима эксплуатации.

Найдем начальную глубину дефекта, при которой за известное количество циклов N_i трещина доросла до критического значения.

Из выражения (16) можно получить

$$a_{нач} = \sqrt[1-\frac{m}{2}]{a_{кр}^{1-\frac{m}{2}} - \sum_{i=1}^n N_i C_0 \left(\frac{Y \Delta \sigma_i \sqrt{\pi}}{\sqrt{1-R}} \right)^m \left(1 - \frac{m}{2} \right)}, \quad (17)$$

где n – количество режимов эксплуатации.

Используя полученное значение $a_{нач}$, можно найти по заданному направлению роста (13) значение $\varphi_{нач}$ и вычислить вероятность наличия трещин в близкой к РБТ области:

$$P_{РБТ,N} = \frac{\int_{c_1}^{c_{кр}} \int_{f_{нач}(c)}^{f_{ТПР}(c)} a^{-n} c^{-m} e^{-\alpha a - \beta c} da dc + \int_{c_{кр}}^L \int_{f_{нач}(c)}^{f_{кр}(c)} a^{-n} c^{-m} e^{-\alpha a - \beta c} da dc}{\int_{c_0}^{\pi R} \int_{a_0}^S a^{-n} c^{-m} e^{-\alpha a - \beta c} da dc}, \quad (18)$$

где

$$c_1 = \frac{\frac{S-a_0}{c_{кр}-c_0} c_{кр} - S + \sqrt{\left(S - \frac{S-a_0}{c_{кр}-c_0} c_{кр} \right)^2 + 4 \frac{S-a_0}{c_{кр}-c_0} a_{нач} \varphi_{нач}}}{2 \frac{S-a_0}{c_{кр}-c_0}}; \quad (19)$$

$f_{нач}(c) = \frac{a_{нач} R \varphi_{нач}}{c}$ – граница области начальных размеров.

⁹ ГОСТ Р 58328-2018. Трубопроводы атомных станций. Концепция «течь перед разрушением». М.: Стандартинформ, 2018. 49 с.

P_N показывает вероятность разрушения сосуда или трубопровода давления без течи через известное количество циклов N . Аналогично можно получить вероятность возникновения ТПР за известное количество циклов.

Определение допустимых значений вероятности разрушения

Допускаемая величина вероятности разрушения ОиТ $[P]$ устанавливается в зависимости от таких факторов, как величина ущерба, который может наступить в случае разрушения, социальная значимость системы и срок ее эксплуатации [17].

В частности, Международной научно-информационной ассоциацией строительной индустрии (CIRIA – Construction Industry Research and Information Association) для сложных инженерных сооружений (плотин, мостов, шельфовых платформ) принята следующая формула для оценки предельно допустимой расчетной вероятности разрушения системы:

$$[P] = \frac{10^{-4}\xi t}{Lk_{HF}}, \quad (20)$$

где t – расчетный срок эксплуатации системы; L – среднее количество людей, которые могут погибнуть в случае разрушения системы; k_{HF} – коэффициент, учитывающий разрушения, связанные с человеческим фактором (обычно принимают $k_{HF} = 10$); ξ – коэффициент социальной значимости системы (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициент социальной значимости для различных типов технических систем

Тип системы	ξ
Объекты массового скопления людей	0,005
Плотины	0,005
Жилые здания, офисные центры, промышленные объекты	0,05
Мосты	0,5
Буровые вышки, шельфовые установки	5

Table 2

Coefficient of social significance for various types of technical systems

System type	ξ
Objects of mass congestion of people	0,005
Dams	0,005
Residential buildings, office centers, industrial facilities	0,05
Bridges	0,5
Drilling rigs, offshore installations	5

Надежность и безопасность считается обеспеченной, если в любой момент рассматриваемого времени выполняется условие

$$P \leq [P]. \quad (21)$$

Таким образом, величина $[P]$ обычно оказывается в диапазоне от 10^{-5} до 10^{-8} .

Пример расчета вероятности разрушения без возникновения течи

Для расширения условий применения концепции ТПР на трубопроводы второго контура и наглядной демонстрации расчета вероятности РБТ рассмотрим пример на основе трубопроводов питательной воды с условным диаметром $DN = 28$ мм и толщиной стенки $S = 3$ мм.

Для определения критических размеров дефектов воспользуемся методикой М-02-91, которая позволяет определить диаграмму критических размеров трещин, используя минимальное количество исходных данных (предел текучести, предел прочности, действующие напряжения на трещину).

Для цилиндрических оболочек с несплошностями, ориентированными в кольцевом направлении, используют зависимости

$$\sigma_b = \frac{2}{\pi} R_F^T [2 \sin \gamma - n_a [a/S]_c \sin(n_\varphi [\varphi]_a)], \quad (22)$$

где

$$\gamma = \frac{1}{2} \left[\pi - n_a [a/S]_c n_\varphi [\varphi]_a - \pi \frac{\sigma_m}{R_F^T} \right]; \quad (23)$$

коэффициенты запаса прочности n_a и n_φ при расчетах критических размеров трещин принимают равными 1; c – половина длины трещины; R – радиус трубы; S – толщина стенки, a – глубина трещины; R_F^T – критерий прочности; σ_m – общие мембранные напряжения, действующие на развитие трещины; $R_{p0,2}^T$ – предел текучести при расчетной температуре; σ_b – общие изгибные напряжения; $\varphi = \frac{c}{R}$.

Рассмотрим цилиндрические оболочки с несплошностями, ориентированными в кольцевом направлении, и преобразуем (22) и (23). Для определения критического размера трещины по течи примем $\frac{a}{S} = 1$ и $n_a = 1$, $n_\varphi = 1$, получим уравнение для определения критического размера длины трещины:

$$\frac{\pi \sigma_b}{2 R_F^T} = 2 \cos\left(\frac{\varphi_{кр}}{2} + \frac{\pi \sigma_m}{2 R_F^T}\right) - \sin \varphi_{кр}. \quad (24)$$

Для нахождения $\varphi_{кр}$ необходимо определить σ_m , σ_b , R_F^T в соответствии с нормами расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. R_F^T определяется по формуле

$$R_F^T = 1,2 \cdot R_{p0,2}^T, \quad (25)$$

где $R_{p0,2}^T$ можно определить исходя из марки стали или сплава, сортамента и температуры эксплуатации в соответствии таблицей П.1 Норм расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок¹⁰.

Для определения напряжений σ_m и σ_b используем максимально допустимые значения напряжений исходя из требований ПНАЭ Г-7-002–86. Подставив полученные значения σ_m , σ_b , R_F^T в уравнение и решив уравнение (24), можно найти значения $\varphi_{кр}$ для разных режимов эксплуатации (табл. 3).

Таблица 3

Результаты вычислений критического значения длины трещины

Показатель, ед. изм.	Нормальные условия эксплуатации	Гидро-испытания	Аварийная ситуация
Критерий прочности R_F^T , МПа	223,2	223,2	223,2
Общие мембранные напряжения σ_m , МПа	65,5	88,4	78,6
Общие изгибные напряжения σ_b , МПа	112	134,3	131
Критическое значение длины трещины $\varphi_{кр}$	0,88	0,67	0,73

Table 3

Results of calculations of the critical value of the crack length

Parameter, units	Normal operating conditions	Hydraulic test	Emergency condition
Strength criterion R_F^T , MPa	223,2	223,2	223,2
General membrane stresses σ_m , MPa	65,5	88,4	78,6
General bending stresses σ_b , MPa	112	134,3	131
Critical value of the crack length $\varphi_{кр}$	0,88	0,67	0,73

¹⁰ ПНАЭ Г-7-002–86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.

Используя значение $\varphi_{кр}^{AC}$, получим

$$D_{кр}^{AC} = 196 \text{ мм}^2. \quad (26)$$

Для определения обнаруженной дефектности рассмотрим данные радиографического контроля трубопроводов питательной воды с условным диаметром 28 мм и толщиной стенки 3 мм. Из данных контроля мы можем получить глубину и длину несплошности, используя консервативные предположения, описанные в разделе «Исходные данные и способы их обработки».

Проведем аппроксимацию гистограммы распределения количества трещин в зависимости от длины и глубины дефекта поверхностью в виде

$$N_{обн}(a, c) = Aa^{-n}c^{-m} (1 - e^{-\alpha(a-a_0)-\beta(c-c_0)}). \quad (27)$$

Используя результаты, полученные по определению коэффициента, учитывающего влияние человеческого фактора, приборно-методических недостатков или сложности доступа к месту контроля, для обеспечения выявления 70 % от общего количества несплошностей в металле, получаем коэффициенты, определяющие особенности проведения контроля [18]:

$$[\alpha] \cong \frac{3,197}{S-a_0} \approx 1,142, \quad (28)$$

$$[\beta] \cong \frac{3,197}{L-c_0} \approx 0,073, \quad (29)$$

где S – толщина стенки; L – полудлина поперечного сечения трубопровода; $a_0 = 0,2$ мм и $c_0 = 0,2$ мм – определяются чувствительностью приборов, используемых при контроле.

Результаты аппроксимации представлены на рис. 3.

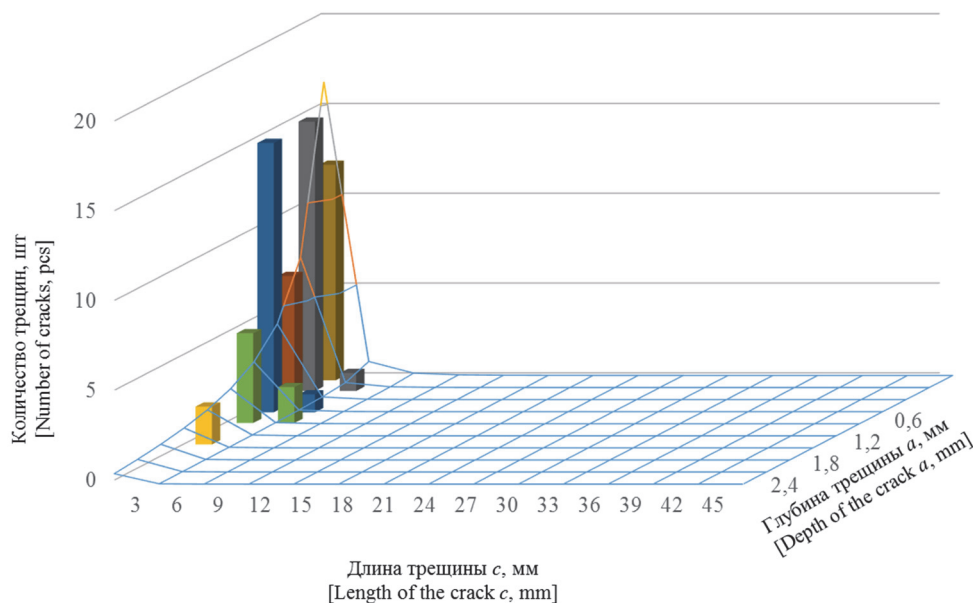


Рис. 3. Гистограмма распределения количества трещин в зависимости от длины и глубины трещины
Figure 3. Distribution of the number of cracks depending on the length and depth of the cracks

По результатам аппроксимации получены значения параметров распределения: $A = 1300$, $n = 2$, $m = 5$.

Вероятность существования трещин вычисляется по (12). Используя полученные значения $\varphi_{кр}^{AC}$, n и m и проводя вычисления, можно получить вероятность существования остаточного дефекта, который может привести к РБТ:

$$P_{РБТ} = 0,11. \quad (30)$$

Выберем начальную трещину из данных НК, расположенную в области II на рис. 2, $a_1 = 0,5$ мм, $c_1 = 5$ мм. Рассмотрим случай подроста трещины по направлению

$$\frac{a}{c} = \frac{a_1}{c_1} = 0,1. \quad (31)$$

Найдем количество циклов N , за которое трещина подрастет от начального до критического размера. Рассмотрим случай при $R = 0$, при котором минимальное напряжения цикла равно 0.

Используя полученные (31) и (28), найдем критическую глубину дефекта для заданного направления роста:

$$a_{кр} = 1,75 \text{ мм}. \quad (32)$$

Из выражения (16), полагая Y равным 1,95, используя табличные значения коэффициентов Пэриса $C_0 = 1,5 \cdot 10^{-11}$ и $m = 3,1$ для углеродистых сталей и их сварных соединений, учитывая коэффициент запаса на количество циклов $n_N = 10$ в соответствии с нормами ПНАЭ Г-7-002–86, можно получить количество циклов, через которое трещина может дорасти до РБТ по заданному направлению (31):

$$N = 106 \text{ циклов}. \quad (33)$$

Определим начальную глубину дефекта, с которой за количество $N = 50$ циклов трещина доросла до критического значения по направлению (31):

$$a_{нач} = 0,87 \text{ мм}. \quad (34)$$

Используя полученное по заданному направлению роста (31) значение $a_{нач}$, найдено значение $\Phi_{нач} = 0,62$ и вычислена вероятность наличия трещин в близкой к РБТ области:

$$P_{РБТ,N} = 3,9 \cdot 10^{-8}. \quad (35)$$

Вероятность P_N определяет вероятность разрушения трубопровода без течи через 50 циклов нагружения с учетом коэффициента запаса на количество циклов $n_N = 10$. Полагая расчетный срок эксплуатации системы $t = 60$ лет, среднее количество людей, которые могут погибнуть в случае разрушения системы $L = 7$ человек, коэффициент социальной значимости системы $\xi = 0,05$, определено допустимое значение вероятности разрушения $[P] = 4,3 \cdot 10^{-6}$. Получено, что условие (21) выполняется, и надежность и безопасность считаются обеспеченными.

Выполнение условия (21) позволяет сделать вывод о возможности применимости концепции ТПР к трубопроводам, не входящим в контур теплоносителя реактора атомной станции.

Заключение

Разработан метод обработки данных НК используя консервативные допущения, который позволяет систематизировать данные, полученные разными методами НК, и определять функцию распределения обнаруженных дефектов по размерам, необходимую для анализа вероятности существования остаточных дефектов.

Установлен критерий развития трещин по сценарию ТПР. Если критерий выполняется, то рост трещины приведет к ТПР, иначе к РБТ. Определена область размеров трещин, которые могут привести к разрушению без возникновения течи. Граница областей ТПР и РБТ определяет границу развития потенциальных (вероятностных) дефектов к различным исходам.

Разработан метод определения вероятности остаточного дефекта, который может привести к разрушению без возникновения течи, а также вероятности существования остаточного дефекта, который может привести к разрушению сосуда или трубопровода давления без течи через известное количество циклов.

Выполнение условия надежности обеспечивает возможность применения концепции ТПР к трубопроводам, не входящим в контур теплоносителя реактора атомной станции, обладающим значимой дефектностью и подверженным механизмам усталости.

Представлен пример расчета вероятности остаточного дефекта, который может привести к РБТ, и вероятности разрушения за известное количество циклов на основе трубопроводов питательной воды.

Список литературы

1. Гетман А.Ф. Концепция безопасности «течь перед разрушением» для сосудов и трубопроводов давления АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1999. 258 с.
2. 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.
3. Heckmann K., Sievers J. Leakage assessment in leak-before-break analysis // *Atomwirtschaft*. 2019. Vol. 64. Issue 10. P. 482.
4. Ferreira da Silva I.G., Andrade A.H.P., Monteiro W. Leak-before-break methodology applied to different piping materials: a performance evaluation // *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2019. Vol. 13. Issue 50. Pp. 46–53. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.50.06>
5. Yin S., Weng Y., Song Z., Cheng B., Gu H., Wang H., Yao J. Mass transfer characteristics of pipeline leak-before-break in a nuclear power station // *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 142. Pp. 194–202. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.06.077>
6. Velez E., Carnicero A., Perera R. Elemental crack advance assessment and verification for its use in LBB analysis // *Nuclear Engineering and Design*, July 2020. Vol. 363. Article 110622. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110622>.
7. Hong S., Kim J., Kim M.-W., Kim H.-D., Lee B.-S., Kim M.-C. Evaluation of LBB characteristics of candidate materials for main steam line piping in Korea nuclear power plants // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2020. Vol. 188. Article 104226. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104226>
8. Zhang J., Wang M., Zhang Z., Sun H., Wu Y.W., Tian W.X., Qiu S.Z., Su G. A comprehensive review of the leak flow through micro-cracks (in LBB) for nuclear system: morphologies and thermal-hydraulic characteristics // *Nuclear Engineering and Design*. 2020. Vol. 362. Article 110537. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110537>
9. Dubyk Y. Application of probabilistic leak-before-break for WWER-1000 unit // *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 22. Pp. 275–282. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.01.035>
10. Li C., Shen Y., He Y., Zhang T., Liu J., Chang L. Study on leak rate in LBB analysis of welded pipe // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 382. Issue 3. Article. 032020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/382/3/032020>
11. Tatu A., Kim J., Kim T. Analysis of double-ended guillotine break at a direct vessel Injection line of ATLAS // *Kerntechnik*. 2018. Vol. 83. Issue 1. Pp. 4–14. <https://doi.org/10.3139/124.110849>
12. Аркадов Г.В., Гетман А.Ф., Родионов А.Н. Надежность оборудования и трубопроводов АЭС и оптимизации их жизненного цикла. М.: Энергоиздат, 2010. 424 с.
13. Кузьмичевский А.Ю., Гетман А.Ф. Определение количественных показателей надежности по критериям разрушения, течи или выявления дефекта в эксплуатации // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. № 10. Т. 76. С. 42–46.
14. Гетман А.Ф. Ресурс эксплуатации сосудов и трубопроводов АЭС. М.: Энергоатомиздат, 2000.
15. Волченко В.Н. Вероятность и достоверность оценки качества металлопродукции. М.: Металлургия, 1987.
16. Троценко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник: в 2 ч. Киев: Наукова думка, 1987. Ч. 1. 505 с.
17. Elishakoff I. Safety factors and reliability: friends or foes? Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004. 295 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2131-2>
18. Кузьмин Д.А., Кузьмичевский А.Ю., Верташенок М.В. Остаточная дефектность и вероятность существования дефектов с размером, превышающим допустимое значение // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 5. С. 414–423. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-5-414-423>

References

1. Getman A.F. *Safety concept “leak before break” for NPP pressure vessels and pipelines*. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 1999. (In Russ.)
2. 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.)
3. Heckmann K., Sievers J. Leakage assessment in leak-before-break analysis. *Atomwirtschaft*. 2019;64(10):482.
4. Ferreira da Silva I.G., Andrade A.H.P., Monteiro W. Leak-before-break methodology applied to different piping materials: a performance evaluation. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2019;13(50):46–53. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.50.06>
5. Yin S., Weng Y., Song Z., Cheng B., Gu H., Wang H., Yao J. Mass transfer characteristics of pipeline leak-before-break in a nuclear power station. *Applied Thermal Engineering*. 2018;142:194–202. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.06.077>
6. Velez E., Carnicero A., Perera R. Elemental crack advance assessment and verification for its use in LBB analysis. *Nuclear Engineering and Design*. 2020;363:110622. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110622>
7. Hong S., Kim J., Kim M.-W., Kim H.-D., Lee B.-S., Kim M.-C. Evaluation of LBB characteristics of candidate materials for main steam line piping in Korea nuclear power plants. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2020;188:104226. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104226>

8. Zhang J., Wang M., Zhang Z., Sun H., Wu Y.W, Tian W.X., Qiu S.Z., Su G. A comprehensive review of the leak flow through micro-cracks (in LBB) for nuclear system: morphologies and thermal-hydraulic characteristics. *Nuclear Engineering and Design*. 2020;362:110537. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110537>
9. Dubyk Y. Application of probabilistic leak-before-break for WWER-1000 unit. *Procedia Structural Integrity*. 2019;22:275–282. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.01.035>
10. Li C., Shen Y., He Y., Zhang T., Liu J., Chang L. Study on leak rate in LBB analysis of welded pipe. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2018;382(3):032020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/382/3/032020>
11. Tatu A., Kim J., Kim T. Analysis of double-ended guillotine break at a direct vessel Injection line of ATLAS. *Kerntechnik*. 2018;83(1):4–14. <https://doi.org/10.3139/124.110849>
12. Arkadov G.V., Getman A.F., Rodionov A.N. *Reliability of NPP equipment and pipelines and optimization of their life cycle (probabilistic methods)*. Moscow: Energoizdat Publ.; 2010. (In Russ.)
13. Kuzmichevsky A.Yu., Getman A.F. Determination of quantitative indicators of reliability according to the criteria for destruction, leakage, or detection of a defect in operation. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2010; 76(10):42–46. (In Russ.)
14. Getman A.F. *Service life of NPP vessels and pipelines*. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 2000. (In Russ.)
15. Volchenko V.N. *Probability and reliability of the assessment of the quality of metal products*. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1987. (In Russ.)
16. Troshchenko V.T., Sosnovskij L.A. *Fatigue resistance of metals and alloys: guide (part 1)*. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1987.
17. Elishakoff I. *Safety factors and reliability: friends or foes?* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 2004. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2131-2>
18. 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. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-5-414-423>