

## ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, ВКЛЮЧАЯ ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ЭКСПЛУАТАЦИЮ И ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ (05.14.03)

УДК 621.039:621.311.22:519.257:519.222:51.74

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-11-17

### Методика определения времени безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов на основе результатов неразрушающего контроля

Д.А. Кузьмин, А.Ю. Кузьмичевский, А.Е. Гусаров

Надежность атомных электростанций (АЭС) влияет на безопасность и стабильность выработки электроэнергии. Надежность оборудования и трубопроводов (ОиТ) АЭС и периодичность эксплуатационного контроля напрямую связаны с механизмами повреждения и их скоростью развития. Одно из значимых повреждений ОиТ — эрозионно-коррозионный износ (ЭКИ), поскольку ОиТ находятся под воздействием высокого давления, температуры и большой скорости потока внутренней среды. Ему подвержено большинство элементов питательного и парового трактов из сталей перлитного класса.

Объектом исследования стали трубные элементы змеевиков подогревателя высокого давления (ПВД) второго контура АЭС с реакторной установкой типа ВВЭР-1000. Изучены зависимости изменений толщины стенки в трубных элементах ПВД от времени на основе анализа статистических данных эксплуатационного неразрушающего контроля.

Предложен способ определения начального состояния толщины стенки металла ОиТ до момента эксплуатации. Представлена методика прогноза распределения толщин стенок объектов контроля в различное время эксплуатации с определением вероятности существования повреждений, вызванных эрозионно-коррозионным износом, для расчета времени безопасной эксплуатации до достижения критического состояния. Получена функция, определяющая границу допустимых значений распределений толщин стенок ПВД, показано, что периодичность эксплуатационного контроля может быть увеличена с 6 (фактическая периодичность контроля) до 9 лет, а следующий эксплуатационный контроль рекомендуется провести через 7,5 лет эксплуатации. Разработан способ определения на объекте контроля существования локального утонения вследствие ЭКИ.

Созданные подходы и результаты исследования можно адаптировать для любых трубопроводов, подверженных утонению стенок, с целью определения периодичности эксплуатационного контроля (включая экспресс-анализ по одному неразрушающему эксплуатационному контролю), времени безопасной эксплуатации и количественной оценки вероятности достижения критического значения.

*Ключевые слова:* атомные электростанции, оборудование и трубопроводы, подогреватель высокого давления, утонение металла, эрозионно-коррозионный износ, статистический и вероятностный анализ.

*Для цитирования:* Кузьмин Д.А., Кузьмичевский А.Ю., Гусаров А.Е. Методика определения времени безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов на основе результатов неразрушающего контроля // Вестник МЭИ. 2020. № 6. С. 11—17. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-11-17.

### A Procedure for Determining the Safe Operation Time of Equipment and Pipelines Based on Nondestructive Testing Results

D.A. Kuz'min, A. Yu. Kuz'michevskiy, A.E. Gusarov

The reliability of nuclear power plants (NPPs) has an influence on power generation safety and stability. The reliability of NPP equipment and pipelines (E&P), and the frequency of in-service inspections are directly linked with damage mechanisms and their development rates. Flow accelerated corrosion (FAC) is one of significant factors causing damages to E&P because these components experience the influence

of high pressure, temperature, and high flow velocity of the inner medium. The majority of feed and steam path components made of pearlitic steels are prone to this kind of wear.

The tube elements used in the coils of high pressure heaters (HPH) operating in the secondary coolant circuit of nuclear power plants equipped with a VVER-1000 reactor plant were taken as the subject of the study. The time dependences of changes in the wall thickness in HPH tube elements are studied proceeding from an analysis of statistical data of in-service nondestructive tests.

A method for determining the initial state of the E&P metal wall thickness before the commencement of operation is proposed. The article presents a procedure for predicting the distribution of examined objects' wall thicknesses at different times of operation with determining the occurrence probability of damages caused by flow accelerated corrosion to calculate the time of safe operation until reaching a critical state. A function that determines the boundary of permissible values of the HPH wall thickness distributions is obtained, and it is shown that the intervals of in-service inspections can be increased from 6 years (the actual frequency of inspections) to 9 years, and the next in-service inspection is recommended to be carried out after 7.5 years of operation. A method for determining the existence of FAC-induced local thinning in the examined object has been developed.

The developed approaches and obtained study results can be adapted for any pipelines prone to wall thinning to determine the frequency of in-service inspections (including an express analysis based on the results of a single nondestructive in-service test), the safe operation time, and quantitative assessment of the critical value reaching probability.

**Key words:** nuclear power plants, equipment and pipelines, high pressure heater, metal thinning, flow accelerated corrosion, statistical analysis, probabilistic analysis.

**For citation:** Kuz'min D.A., Kuz'michevskiy A.Yu., Gusarov A.E. A Procedure for Determining the Safe Operation Time of Equipment and Pipelines Based on Nondestructive Testing Results. Bulletin of MPEI. 2020;6:11—17. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-11-17.

## Введение

Повреждаемость теплообменного оборудования отрицательно влияет на надежность и стабильность выработки электроэнергии атомных электростанций (АЭС). Подогреватели высокого давления (ПВД) — наиболее повреждаемые элементы оборудования второго контура АЭС. Основные причины отказов ПВД — утонение входных участков плоскоспиральных трубных элементов (змеевиков) и повреждения фланцевых разъемов. Из-за частых отключений ПВД для выяснения причин повреждений, замены или ремонта змеевиков недовыработка может составлять до 4% [1, 2]. Кроме того, утонение входных участков змеевиков приводит к вносу в парогенератор продуктов коррозии (соединений железа) и отложению их на теплообменных трубках. Отложения вызывают процессы, способствующие коррозионному растрескиванию трубок парогенераторов [3, 4]. Описанные проблемы эрозионно-коррозионного износа (ЭКИ) регулярно обсуждаются последние 20 лет и актуальны в настоящее время [5 — 8].

Высокая повреждаемость ПВД на участках плоскоспиральных элементов (рис. 1) — итог совместного влияния коррозионного и теплогидравлического воздействий, результатом которого является ЭКИ.

Вопросы повреждаемости оборудования и трубопроводов (ОиТ) по механизму ЭКИ исследованы многими специалистами [9 — 14]. Были выделены следующие основные причины возникновения ЭКИ:

- перлитная сталь (низкое содержание или отсутствие хрома);
- резкое изменение геометрии потока на входе и выходах из змеевиков;
- отсутствие прямолинейных участков змеевиков;
- высокая скорость потока и т. д.

В результате ЭКИ возникают различные формы локальных утонений, существенно влияющих на прочность элементов трубопроводов [15].

Змеевик ПВД эксплуатируется при температуре 235 °С и давлении — 11,77 МПа, внутренний диаметр — 32 мм, номинальная толщина  $S_{\text{ном}}$  — 4 мм. Общий вид конструкции одноплоскостной спирали змеевика представлен на рис. 1.

## Определение начального состояния толщины стенки металла трубных элементов подогревателя высокого давления

Для исследования вероятности существования утонения металла использованы результаты ультразвуковой толщинометрии (фактическое значение толщин) на плоскоспиральных трубных элементах ПВД энергоблока с РУ типа ВВЭР-1000 в количестве 1312 измерений через 1 год эксплуатации после замены змеевика. Нормальное распределение удовлетворительно описывает полученные результаты эксплуатационного контроля (рис. 2).

При оценке изменения фактической толщины стенки ПВД необходимо иметь результаты первичного не-

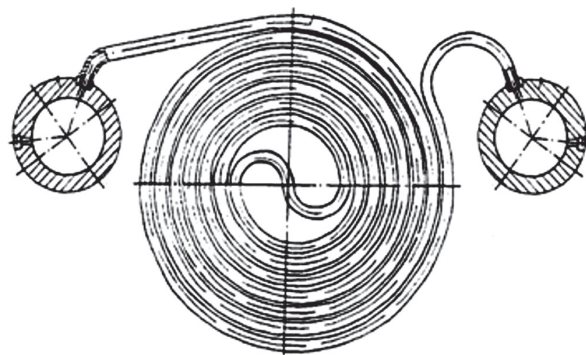


Рис. 1. Схема змеевика подогревателя высокого давления

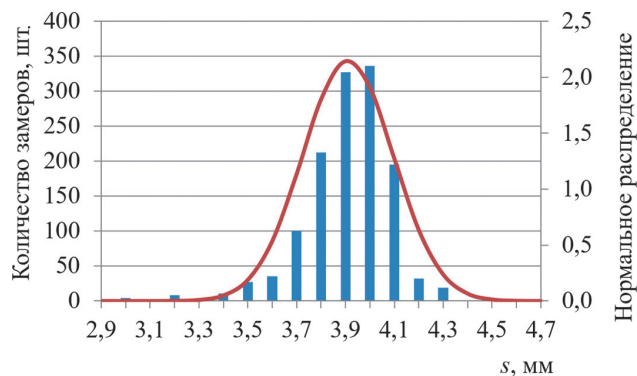


Рис. 2. Толщины стенок  $s$  змеевиков ПВД и нормальное распределение на примере реальных данных эксплуатационного контроля

разрушающего контроля. Для этого разработан способ определения начального состояния толщин стенки (СОНСТС) трубных элементов ПВД до момента начала эксплуатации на основании нормативных требований на изготовление и нормального закона распределения (рис. 3). В нормативных требованиях на изготовление трубных элементов ПВД [16] регламентированы допуски на толщину стенки в пределах  $-12,5...12,5\%$  от номинального значения, которые, исходя из опыта эксплуатации, удовлетворительно описываются распределением Гаусса. Значения толщин стенок трубных элементов ПВД, не входящих в указанный диапазон, бракуются заводом-изготовителем, поэтому в эксплуатацию не допускаются. Таким образом, для анализа было принято, что величина, равная  $12,5\%$ , соответствует отклонению, равному трем среднеквадратичным отклонениям (правило трех сигм), при этом ошибка в расчетах составляет около  $1\%$ . На основании указанных допусков на изготовление и вероятности существования указанных разбросов ( $P = 99\%$ ) определены математическое ожидание  $\mu$  и среднеквадратичное отклонение  $\sigma$  толщин стенок трубных элементов ПВД до момента начала эксплуатации (таблица).

### Определение времени безопасной эксплуатации

Исходя из данных таблицы, определены линейные зависимости для математического ожидания  $\mu(t)$  и

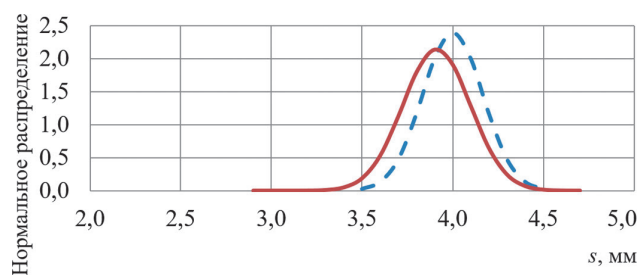


Рис. 3. Распределение толщин стенок  $s$  трубных элементов ПВД на момент начала и после 1 года эксплуатации на примере реальных данных эксплуатационного контроля:

— — предэксплуатационный контроль; — — по результатам ЭК

### Основные параметры для нормального распределения толщин стенок трубных элементов ПВД в различное время эксплуатации

Результаты контроля	$\mu$ , мм	$\sigma$ , мм	Время эксплуатации, год
Начальное состояние (СОНСТС)	4,0	0,17	0
Эксплуатационный контроль ПВД	3,9	0,19	1

среднеквадратичного отклонения  $\sigma(t)$  толщин стенок от времени эксплуатации  $t$ , в предположении, что средняя скорость утонения меняется линейно от времени эксплуатации:

$$\begin{cases} \mu(t) = -0,1t + 4; \\ \sigma(t) = 0,02t + 0,17. \end{cases} \quad (1)$$

Линейная зависимость скорости ЭКИ от времени эксплуатации объекта контроля считается наиболее распространенным (консервативным) подходом при анализе повреждений. В действительности, на основе анализа опыта эксплуатации различных объектов контроля на АЭС установлено, что в первые годы работы средняя скорость ЭКИ (изменение математического ожидания  $\mu(t)$ ) имеет высокое значение, затухает по экспоненциальному закону и после 3 — 5 лет эксплуатации становится близким к линейному закону [17]. Изменение среднеквадратичного отклонения от времени эксплуатации ОиТ подтверждает наличие на объекте локального утонения на основе фиксирования зон с большим утонением.

На основе полученных зависимостей  $\mu(t)$  и  $\sigma(t)$  (1) можно прогнозировать распределение толщин стенок трубных элементов ПВД. На рисунке 4 даны результаты распределения толщин стенок трубных элементов ПВД для этапа изготовления, после 1 года эксплуатации (результаты эксплуатационного контроля) и прогнозируемое значение допустимого распределения результатов контроля, соответствующее 9 годам эксплуатации ( $\mu = 3,1$ ;  $\sigma = 0,35$ ), не превышающее минимально допустимого показателя толщины  $[s]$  трубок ПВД с вероятностью  $P = 10^{-2}$ .

Указанная вероятность получена на основе расчета по формуле для условия существования утонения толщины стенки трубных элементов ПВД менее допустимого значения  $[s] = 2,3$  мм с учетом скорости изменения толщин стенок на основе (1):

$$P(t) = \int_0^{[s]} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx.$$

Подобный подход изложен в [18], где исследованы количественные показатели надежности по критериям

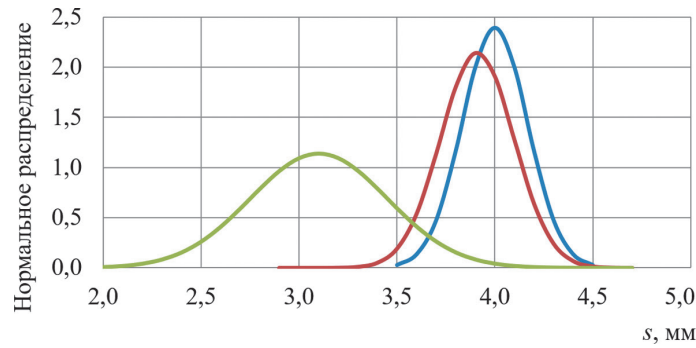


Рис. 4. Результаты распределения толщин стенок  $s$  трубных элементов ПВД в различные периоды эксплуатации и максимально допустимое распределение значений на примере реальных данных эксплуатационного контроля:

— предэксплуатационный контроль; — по результатам ЭК; — максимально допустимое значение

разрушения течи или выявление дефекта в эксплуатации для оборудования и трубопроводов с трещиноподобными дефектами.

На рисунке 5 изображена расчетная зависимость вероятности существования толщин стенок трубных элементов ПВД менее допустимого значения  $[s] = 2,3$  мм в различное время эксплуатации.

Указанный подход может применяться для любого другого нормированного распределения, различных режимов эксплуатации и допустимых значений толщин стенок, а результаты анализа времени безопасной эксплуатации следует уточнять по результатам последующих эксплуатационных контролей.

**Построение области допустимых значений распределений толщин стенок трубных элементов подогревателя высокого давления**

Область критических значений  $\mu$  и  $\sigma$ , исходя из условия, что вероятность существования значений толщин стенок трубных элементов ПВД менее  $[s]$  равна  $10^{-2}$ , с использованием функции плотности вероятности представим следующим образом:

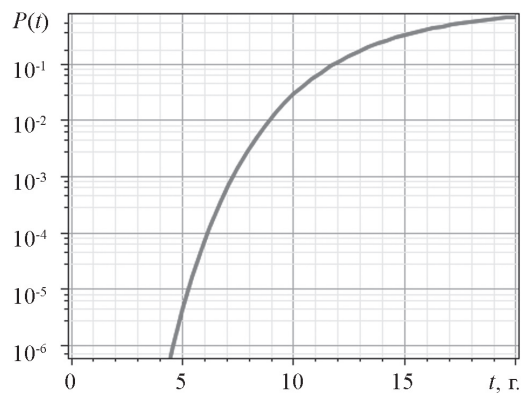


Рис. 5. Зависимость вероятности существования толщин стенок действующих трубных элементов ПВД менее допустимого значения ( $[s]=2,3$  мм) в различные периоды эксплуатации

$$F(\sigma, \mu, P) = \int_0^{[s]} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx - P.$$

На рисунке 6 построена функция критических значений  $\mu$  и  $\sigma$  для трубных элементов ПВД, разделяющая

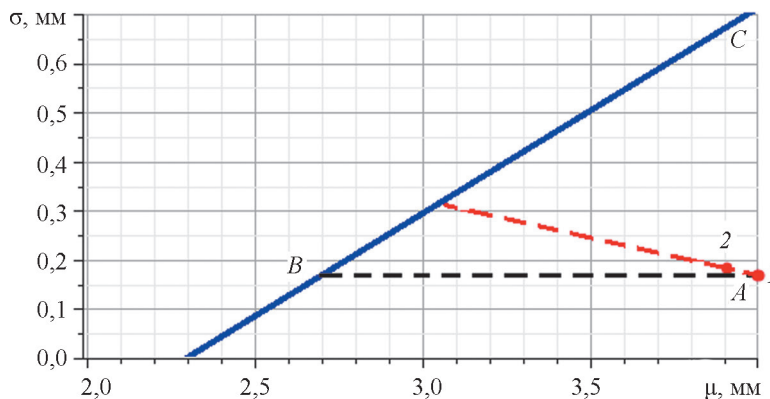


Рис. 6. Функция критических значений  $\mu$  и  $\sigma$  для трубных элементов ПВД:

$I$  — начальное состояние (СОНСТС);  $2$  — эксплуатационный контроль ПВД (таблица); — — направляющая линия, определяющая равномерное утонение стенки змеевика ПВД ( $\sigma = \text{const}$ ); - - - направляющая линия прогнозируемого ЭКИ стенок труб ПВД;  $\Delta ABC$  — область допустимых комбинаций значений  $\mu$  и  $\sigma$ , при которых на трубках ПВД существуют локальные утонения вследствие ЭКИ



области допустимых (правее функции) и недопустимых (левее функции) значений нормальных распределений толщин стенок трубных элементов ПВД для вероятности  $P = 10^{-2}$ :

$$\sigma = 0,417\mu - 0,958 \quad \text{при} \quad \begin{cases} [s] \leq \mu \leq \mu_{\text{сонстс}}; \\ \sigma \geq \sigma_{\text{сонстс}}. \end{cases}$$

Так, анализируя результаты эксплуатационного контроля ОиТ и зная функцию критических значений  $\mu$  и  $\sigma$ , можно определить наличие на контролируемом объекте локальных утонений вследствие ЭКИ, зафиксировать равномерный износ или запретить дальнейшую эксплуатацию, поскольку вероятность недопустимых утонений близка к единице.

### Заключение

Предложен способ определения начального состояния толщины стенки (СОНСТС) металла оборудования и трубопроводов до момента эксплуатации на основе анализа нормируемых значений по нормативно-техни-

ческим документам на изготовление (ГОСТ, ТУ и др.) при отсутствии результатов сплошной толщинометрии объекта контроля.

Разработан вероятностный подход на базе характеристик распределений  $\mu(t)$  и  $\sigma(t)$  для прогнозирования времени безопасной эксплуатации объекта контроля до достижения минимально допустимого значения толщины стенки металла объекта контроля.

Для исследуемого объекта контроля (змеевик ПВД) определено, что время безопасной эксплуатации с момента последнего эксплуатационного контроля составляет 9 лет, а следующий эксплуатационный контроль рекомендуется провести через 7,5 лет работы, однако, периодичность контроля (на основе нормативных документов) для этого объекта составляет 6 лет.

Определена функция критических значений  $\mu$  и  $\sigma$  для змеевика ПВД, разделяющая области допустимых и недопустимых значений нормальных распределений толщин стенок ПВД.

Предложен способ определения на объекте контроля существования локального утонения вследствие ЭКИ.

### Литература

1. Покутный Н.С. и др. Информационная система по качеству и надежности оборудования АЭС // Атомная энергия. 1989. № 5 (67). С. 359—360.
2. Титов В.Ф. Международное совещание специалистов по эксплуатации парогенераторов энергоблоков АЭС с ВВЭР-440 и -1000 // Атомная энергия. 1991. № 3 (71). С. 270—271.
3. Балабан-Ирменин Ю.В., Федосеев Б.С., Марушкин В.М. Результаты обследования коррозионных повреждений ПВД энергоблоков сверхкритического давления // Электрические станции. 1991. № 8. С. 32—40.
4. Кравченко В.П. Влияние отключения подогревателей высокого давления на изменение уровня в парогенераторах АЭС // Труды Одесского политехн. ун-та. 2006. № 1 (25). С. 52—56.
5. Бараненко В.И. и др. Эксплуатационная надежность теплообменных труб парогенераторов энергоблоков АЭС с ВВЭР // Материалы семинара на Калининской АЭС. 1999. С. 133—158.
6. Томаров Г.В., Шипков А.А. Международная конференция «Эрозионно-коррозионный износ-2016» // Теплоэнергетика. 2017. № 5. С. 34—39.
7. Бараненко В.И., Кузьмин Д.А., Овчаров О.В., Кузьмичевский А.Ю., Гусаров А.Е. Использование программных средств для прогнозных расчетов длительности эксплуатации трубопроводов АЭС с различными реакторными установками // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Материалы Междунар. науч.-техн. конф. Подольск, 2019. С. 1—13.
8. Бараненко В.И. и др. Эрозионно-коррозионные повреждения трубных систем подогревателей высокого давления на АЭС с ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 // Безопасность трубопроводов: Материалы Междунар. конф. М., 1999. Т. 2. С. 208—212.

### References

1. Pokutnyy N.S. i dr. Informatsionnaya Sistema po Kachestvu i Nadezhnosti Oborudovaniya AES. Atomnaya Energiya. 1989;5 (67):359—360. (in Russian).
2. Titov V.F. Mezhdunarodnoe Soveshchanie Spetsialistov po Ekspluatatsii Parogeneratorov Energoblokov AES s VVER-440 i -1000. Atomnaya Energiya. 1991;3 (71): 270—271. (in Russian).
3. Balaban-Irmenin Yu.V., Fedoseev B.S., Marushkin V.M. Rezul'taty Obsledovaniya Korroziionnykh Povrezhdeniy PVD Energoblokov Sverkhkriticheskogo Davleniya. Elektricheskie Stantsii. 1991;8:32—40. (in Russian).
4. Kravchenko V.P. Vliyanie Otklyucheniya Podogrevateley Vysokogo Davleniya na Izmenenie Urovnya v Parogeneratorakh AES. Trudy Odesskogo Politekhn. Un-ta. 2006;1 (25):52—56. (in Russian).
5. Baranenko V.I. i dr. Ekspluatatsionnaya Nadezhnost' Teploobmennykh Trub Parogeneratorov Energoblokov AES s VVER. Materialy Seminara na Kalininskoy AES. 1999:133—158. (in Russian).
6. Tomarov G.V., Shipkov A.A. Mezhdunarodnaya Konferentsiya «Eroziionno-korroziionnyy Iznos-2016». Teploenergetika. 2017;5:34—39. (in Russian).
7. Baranenko V.I., Kuz'min D.A., Ovcharov O.V., Kuz'michevskiy A.Yu., Gusarov A.E. Ispol'zovanie Programmnykh Sredstv dlya Prognoznykh Raschetov Dlitel'nosti Ekspluatatsii Truboprovodov AES s Razlichnymi Reaktornymi Ustanovkami. Obespechenie Bezopasnosti AES s VVER: Materialy Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf. Podol'sk, 2019:1—13. (in Russian).
8. Baranenko V.I. i dr. Eroziionno-korroziionnye Povrezhdeniya Trubnykh Sistem Podogrevateley Vysokogo Davleniya na AES s VVER-440 i VVER-1000. Bezopasnost' Truboprovodov: Materialy Mezhdunar. Konf. M. 1999;2:208—212. (in Russian).

9. Бараненко В.И., Гулина О.М., Сальников Н.Л. Расчет скорости коррозии и остаточного ресурса элементов трубопроводов АЭС по данным контроля // Известия высших учебных заведений. Серия «Ядерная энергетика». 2017. № 4. С. 83—93.

10. Томаров Г.В., Шипков А.А., Комиссарова Т.Н. Локальная эрозия-коррозия сварных соединений трубопроводов энергоблоков АЭС: особенности механизма и предупреждение повреждений // Теплоэнергетика. 2019. № 2. С. 76—86.

11. Кузьмин Д.А., Кузьмичевский А.Ю. Определение фактических толщин стенок оборудования и трубопроводов, подверженных эрозионно-коррозионному износу на примере конических переходов // Надежность и безопасность энергетики. 2019. № 12 (4). С. 274—280.

12. Vivekanand Kain. Flow Accelerated Corrosion: Forms, Mechanisms and Case Studies // Procedia Eng. 2014. V. 86. Pp. 576—588.

13. Адаменков А.К., Веселова И.Н., Шпицер В.Я. Оценка развития эрозионно-коррозионного износа с помощью метода измерения магнитной анизотропии // Глобальная ядерная безопасность. 2019. № 1 (30). С. 113—119.

14. Ожигов Л.С. и др. Особенности коррозионно-эрозионного износа трубных элементов на АЭС с ВВЭР-1000 // Сборник научных трудов СНУЯЕтаП. 2013. С. 52—60.

15. Кузьмин Д.А., Андреевкова А.В. Исследование закономерностей напряженно-деформированного состояния при локальном утонении в прямолинейных участках трубопроводов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. № 15 (5). С. 384—391.

16. ГОСТ 8732—78. Трубы стальные бесшовные горячеделиформированные. Сортамент (с изменениями № 1, 2).

17. Кузьмин Д.А., Бараненко В.И. Влияние отложений на характер коррозионных процессов и ультразвуковой контроль толщин стенок трубопроводов // Тяжелое машиностроение. 2020. № 4. С. 20—24.

18. 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 (76). С. 42—45.

9. Baranenko V.I., Gulina O.M., Sal'nikov N.L. Raschet Skorosti Korrozii i Ostatochnogo Resursa Elementov Truboprovodov AES po Dannym Kontrolya. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Seriya «Yadernaya Energetika». 2017;4:83—93. (in Russian).

10. Tomarov G.V., Shipkov A.A., Komissarova T.N. Lokal'naya Eroziya-korroziya Svarnykh Soedineniy Truboprovodov Energeblokov AES: Osobennosti Mekhanizma i Preduprezhdenie Povrezhdeniy. Teploenergetika. 2019;2:76—86. (in Russian).

11. Kuz'min D.A., Kuz'michevskiy A.Yu. Opredelenie Fakticheskikh Tolshchin Stenok Oborudovaniya i Truboprovodov, Podverzhennykh Erozionno-korrozionnomu Iznosu na Primere Konicheskikh Perekhodov. Nadezhnost' i Bezopasnost' Energetiki. 2019;12 (4):274—280. (in Russian).

12. Vivekanand Kain. Flow Accelerated Corrosion: Forms, Mechanisms and Case Studies. Procedia Eng. 2014;86:576—588.

13. Adamenkov A.K., Veselova I.N., Shpits'er V.Ya. Otsenka Razvitiya Erozionno-Korrozionnogo Iznosa s Pomoshch'yu Metoda Izmereniya Magnitnoy Anizotropii. Global'naya Yadernaya Bezopasnost'. 2019;1 (30):113—119. (in Russian).

14. Ozhigov L.S. i dr. Osobennosti Korrozionno-erozionnogo Iznosa Trubnykh Elementov na AES s VVER-1000. Sbornik Nauchnykh Trudov SNUYAEtaP. 2013:52—60. (in Russian).

15. Kuz'min D.A., Andreenkova A.V. Issledovanie Zakonomernostey Napryazhenno-deformirovannogo Sostoyaniya pri Lokal'nom Utonenii v Pryamolineynykh Uchastkakh Truboprovodov. Stroitel'naya Mekhanika Inzhenernykh Konstruktsiy i Sooruzheniy. 2019;15 (5):384—391. (in Russian).

16. GOST 8732—78. Truby Stal'nye Besshovnye Goryachedeformirovannye. Sortament (s Izmeneniyami № 1, 2). (in Russian).

17. Kuz'min D.A., Baranenko V.I. Vliyanie Otlozheniy na Kharakter Korroziynykh Protsesov i Ul'trazvukovoy Kontrol' Tolshchin Stenok Truboprovodov. Tyazheloe Mashinostroenie. 2020;4:20—24. (in Russian).

18. Kuz'michevskiy A.Yu., Getman A.F. Opredelenie Kolichestvennykh Pokazateley Nadezhnosti po Kriteriyam Razrusheniya, Tечи ili Vyyavleniya Defekta v Ekspluatatsii. Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov. 2010;10 (76):42—45.

#### Сведения об авторах:

**Кузьмин Дмитрий Александрович** — кандидат технических наук, начальник отдела прочностной надежности АЭС Всероссийского научно-исследовательского института по эксплуатации атомных электростанций, Москва, e-mail: Kuzmin\_DA@yahoo.com

**Кузьмичевский Александр Юрьевич** — кандидат технических наук, главный эксперт отдела прочностной надежности АЭС Всероссийского научно-исследовательского института по эксплуатации атомных электростанций, Москва, e-mail: akuzmichevskiy@yandex.ru

**Гусаров Артем Евгеньевич** — аспирант, инженер отдела прочностной надежности АЭС Всероссийского научно-исследовательского института по эксплуатации атомных электростанций, Москва, e-mail: gus.art2012@yandex.ru

**Information about authors:**

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

**Kuz'michevskiy Aleksandr Yu.** — Ph.D. (Techn.), Chief Expert Reliability for Nuclear Power Plant Dept., All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation, Moscow, e-mail: akuzmichevskiy@yandex.ru

**Gusarov Artem E.** — Ph.D.-student, Engineer of Reliability for Nuclear Power Plant Dept., All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation, Moscow, e-mail: gus.art2012@yandex.ru

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

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

**Статья поступила в редакцию:** 18.02.2020

**The article received to the editor:** 18.02.2020