

ДИНАМИКА КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ
DYNAMICS OF STRUCTURES AND BUILDINGSDOI 10.22363/1815-5235-2019-15-5-384-391
УДК 621.039:539.4.013:620.19

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Исследование закономерностей напряженно-деформированного состояния при локальном утонении в прямолинейных участках трубопроводов

Д.А. Кузьмин, А.В. Андрееenkova*

АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций», Российская Федерация, 109507, Москва, ул. Ферганская, 25

*Andreenkova26@list.ru

История статьи:

Поступила в редакцию: 05 августа 2019 г.

Доработана: 01 октября 2019 г.

Принята к публикации: 03 октября 2019 г.

Аннотация

Актуальность. На АЭС содержится большое количество оборудования и трубопроводов, подверженных эрозионно-коррозионному износу. В результате сочетания различных параметров – типоразмеров (диаметры, толщина стенок), эксплуатационных параметров (внутреннее давление, температура), марок сталей и типов элементов – количество расчетных случаев составляет десятки тысяч, не считая возможных форм утонений. В процессе технического обслуживания и ремонта на станциях проводят оценку соответствия фактических и допускаемых значений толщины стенок. Для обеспечения безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов введены поправочные функции к нормативным зависимостям, учитывающие форму утонения, для определения допустимых утонений. **Цель.** Поставлена задача определить влияние форм локальных утонений на напряженно-деформированное состояние и критическое утонение для прямолинейных участков трубопроводов, подверженных механизму эрозионно-коррозионного износа с учетом аварийных режимов. **Методы.** Для определения допускаемых значений коэффициентов концентрации напряжений трубопроводов, подверженных эрозионно-коррозионному износу, были использованы требования федеральных норм и правил с учетом аварийных режимов эксплуатации. Для исследования коэффициентов концентрации напряжений использовался метод конечных элементов и аналитические методы для различных форм, размеров и глубин утонений. **Результаты.** Разработан метод, который позволяет получить допускаемые значения коэффициентов концентрации напряжений для аварийных режимов эксплуатации, что позволяет определить допускаемую глубину утонения в аварийных режимах – критерий сверху. Проведены исследования по определению коэффициентов концентрации напряжений при локальном утонении для различных форм этих утонений. Определены зависимости коэффициентов концентрации от геометрических параметров локального утонения при заданной толщине стенки для прямолинейного участка трубопровода. В результате исследований построены зависимости глубины утонений от коэффициентов концентраций для прямолинейных участков трубопроводов, получена мастер-кривая. Проведенные исследования учитывают нагрузку от внутреннего давления и изгибающего момента.

Ключевые слова: трубопроводы; эрозионно-коррозионный износ; объемное утонение; коэффициент концентрации напряжений; прочность

Для цитирования

Кузьмин Д.А., Андрееenkova А.В. Исследование закономерностей напряженно-деформированного состояния при локальном утонении в прямолинейных участках трубопроводов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 5. С. 384–391. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-384-391>

Кузьмин Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, начальник отдела надежности.

Андрееenkova Анастасия Валерьевна, магистр, инженер 1 категории.

© Кузьмин Д.А., Андрееenkova А.В., 2019



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

Введение

Локальный износ металла – распространенный вид повреждения на оборудовании и трубопроводах. Основным механизмом этого повреждения является эрозионно-коррозионный износ (ЭКИ). Этому процессу подвержены практически все элементы конденсатно-питательного и парового трактов турбоустановок АЭС и ТЭС. Другие виды износа металла в большинстве случаев протекают совместно с этим процессом, как показано в научных трудах [1–5]. Сосуды давления и трубопроводные системы ядерных энергетических установок относятся к категории критически важных элементов, в значительной степени определяющих их ресурс, надежность, живучесть и безопасность эксплуатации. Для обеспечения техногенной безопасности АЭС используют современные технологии, позволяющие разработать и внедрить разнообразные системы безопасности [6].

Повреждение металла в процессе ЭКИ приводит к специфическим объемным формам износа – утонениям [7]. Утонения влекут возникновение концентрации напряжений в элементах конструкций [8–11]. Для обеспечения прочности и прогнозирования ресурса оборудования и трубопроводов, подверженных ЭКИ, необходимо исследовать напряжения в зоне локальных утонений в зависимости от геометрических параметров, а также уточнить механизм коррозионного воздействия, влияющего на форму и протяженность локального утонения [12–16].

Концентратор напряжений (α_σ) [17] – это отношение максимальных напряжений (σ_{\max}) в зоне локального утонения к номинальным напряжениям ($\sigma_{\text{ном}}$) в той же зоне без повреждений элементов оборудования или трубопровода:

$$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{ном}}} \quad (1)$$

В ходе исследования было рассмотрено влияние различных форм утонения на напряженно-деформированное состояние, а также определено критическое утонение для прямолинейных участков трубопроводов, подверженных механизму ЭКИ с учетом аварийных режимов.

1. Методы исследований

Расчет концентратора напряжений при локальном сферическом утонении

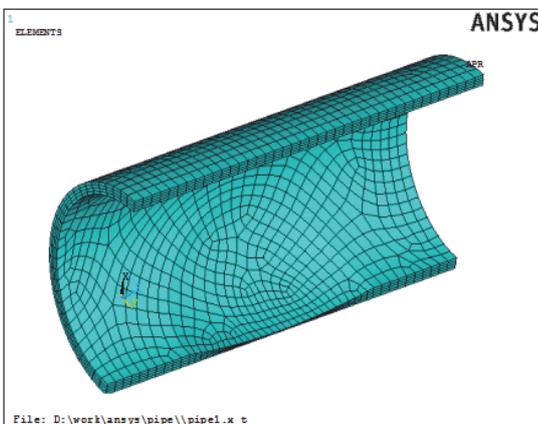
Для расчетов была взята цилиндрическая оболочка с внешним диаметром (D) 530 мм, толщиной (s) 28 мм. Расчетные модели были построены в программном комплексе ANSYS Mechanical (лицензия № 662207 от 21.03.2012). Для построения модели использовался трехмерный элемент объемного напряженно-деформированного состояния с 20 узлами – SOLID186.

Исходные данные независимо друг от друга варьировались в следующих диапазонах:

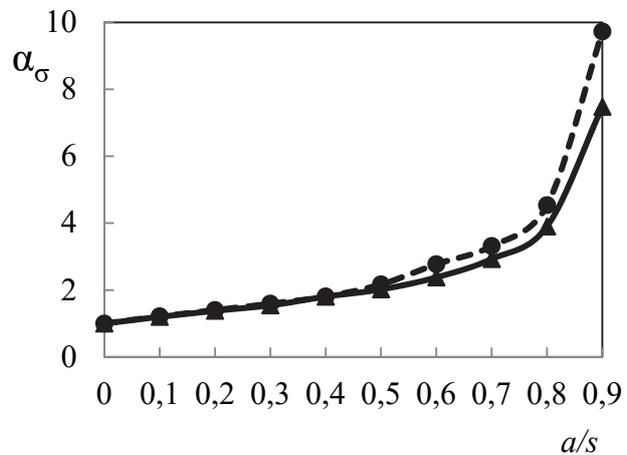
– относительная глубина утонения (a/s) – изменялась в диапазоне от $0,1s$ до $0,9s$ с шагом $0,1s$, где a – глубина утонения;

– утонение моделировалось как часть усеченной сферы, протяженность утонения – L с протяженностью, кратной внешнему диаметру D и $0,5D$.

Расчетная модель представлена на рис. 1, а. В результате расчетов получены значения коэффициента концентрации напряжений от относительного утонения цилиндрической оболочки. На рис. 1, б представлены графики зависимости коэффициента концентрации напряжений от относительного утонения трубопровода, где кривая 1 соответствует утонению с протяженностью D , а кривая 2 – $0,5D$.



а



б

Рис. 1. Расчетная модель (а) и значения коэффициента концентрации напряжений от величины сферического утонения (б)
[Figure 1. Calculation model (a) and value of stress concentration coefficient of spherical thinning value (b)]

Расчет концентратора напряжений при обширном локальном утонении

Для расчета напряжений при обширном локальном утонении использовалась модифицированная аналитическая формула [18], которая позволяет точно определить мембранные напряжения в максимально утоненном месте (А):

$$\sigma = p \left(\frac{2R^2 \left[R^2 + \left(R - s + \frac{a}{2} \right)^2 - 2 \frac{a}{2} \left(R - s + \frac{a}{2} \right) - \frac{a^2}{2} \right]}{\left[\left(R - s + \frac{a}{2} \right)^2 + R^2 \right] \left[R^2 - \left(R - s + \frac{a}{2} \right)^2 - 2 \frac{a}{2} \left(R - s + \frac{a}{2} \right) - \frac{a^2}{2} \right]} - 1 \right), \quad (2)$$

где R – наружный радиус цилиндрической оболочки; s – толщина стенки трубопровода; a – глубина утонения, p – внутреннее давление.

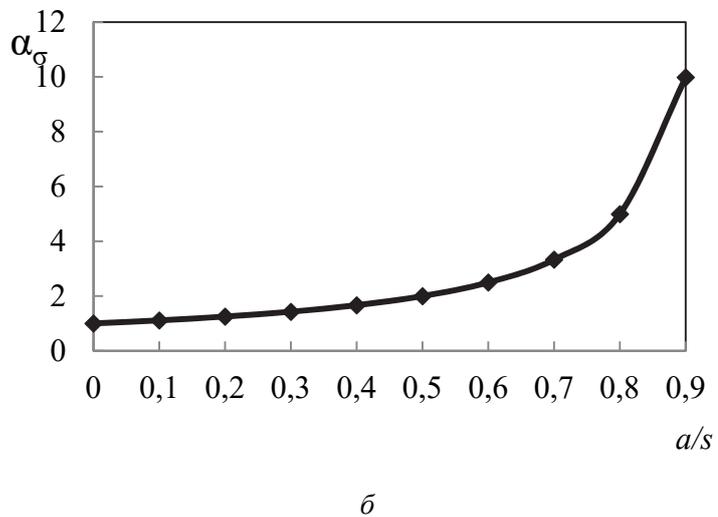
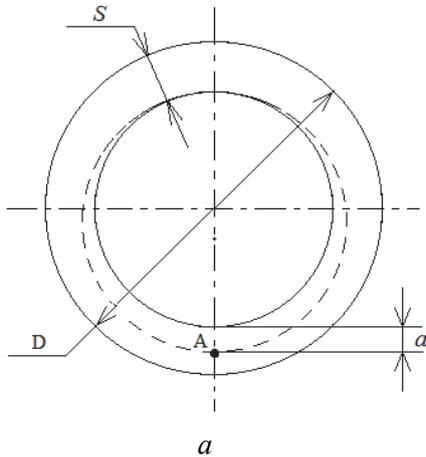


Рис. 2. Расчетная схема (а) и значения коэффициента концентрации напряжений от величины обширного утонения (б)
 [Figure 2. Settlement scheme (a) and value of stress concentration coefficient of extensive thinning value (б)]

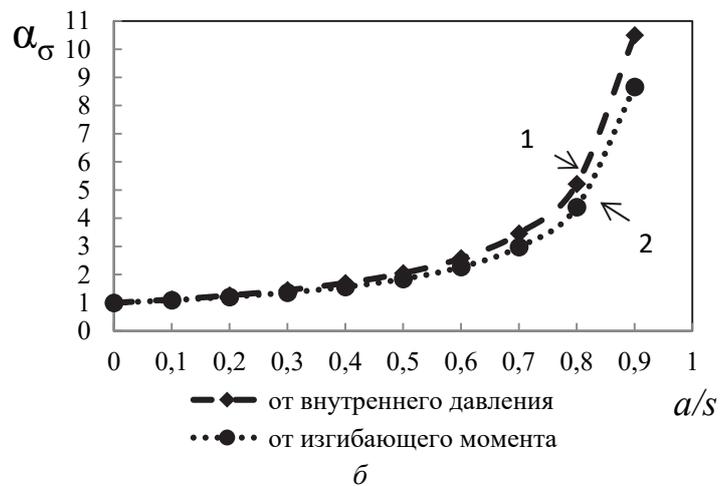
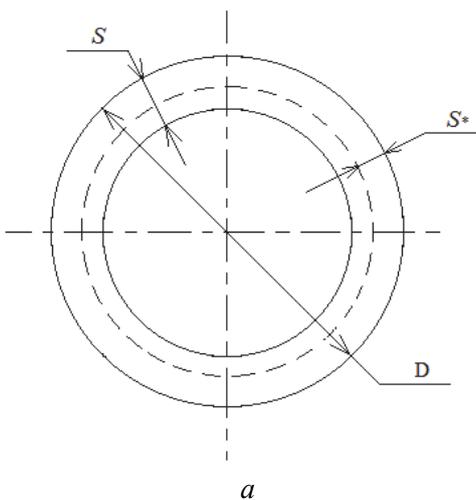


Рис. 3. Расчетная схема (а) и величины коэффициента концентрации напряжений при равномерном утонении (б)
 [Figure 3. Settlement scheme (a) and value of stress concentration coefficient with even thinning (б)]

При расчете максимальных напряжений в зоне локального утонения толщина стенки равна $s - a$, где a – глубина утонения.

Напряжения от изгибающего момента:

$$\sigma_M = \frac{M}{W}, \quad (4)$$

где M – изгибающий момент; W – момент сопротивления.

Используя формулы (1), (3) и (4) можно определить коэффициент концентрации напряжений при действии на трубопровод внутреннего давления и изгибающего момента:

$$\alpha_\sigma = \frac{\frac{p(D-s+a)}{2(s-a)} + \frac{M}{W(a)}}{\frac{p(D-s)}{2s} + \frac{M}{W}}. \quad (5)$$

Расчетная схема показана на рис. 3, а, график зависимости представлен на рис. 3, б.

Скорость увеличения функции концентратора напряжений от внутреннего давления больше, чем от изгибающего момента. Если изгибающий момент равен нулю, то функция будет соответствовать кривой 1 (рис. 3, б), при внутреннем давлении, равном нулю, – кривой 2, при их комбинации функция будет лежать между этими двумя кривыми. Консервативно оценивать допускаемое утонение по кривой 1 – от внутреннего давления.

2. Обобщение результатов

На рис. 4 представлено обобщение результатов с формами утонений: сферическое, обширное и равномерное.

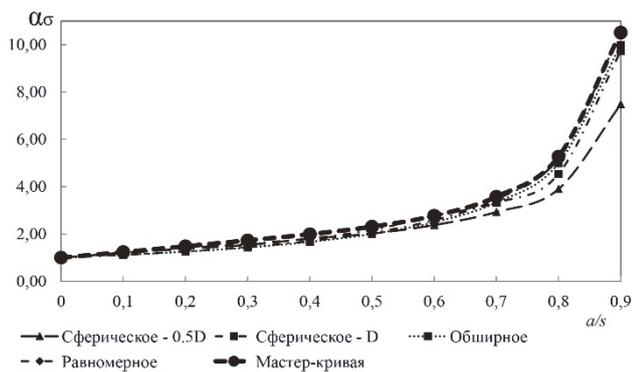


Рис. 4. Графики зависимости коэффициента концентрации напряжений от относительного утонения трубопровода [Figure 4. Graphs of the stress concentration coefficient on the relative thinning of the pipeline]

При обобщении полученных результатов получена огибающая сверху кривая α_σ^{Σ} (мастер-кривая), где за базовую функцию принята нормативная кривая при равномерном утонении, средняя погрешность 3,5 %:

$$\alpha_\sigma^{\Sigma} = \left[\left(1.2 - \frac{a}{s} \right) \frac{a}{s} \cos^3 \left(\frac{\pi a}{2s} \right) + 1 \right] \alpha_\sigma. \quad (6)$$

Множитель в формуле (6) консервативно учитывает влияние от различных форм утонений. Для оценки прочности трубопровода с утонением или для определения допускаемых толщин стенок в трубопроводах рекомендуется использовать

$$\sigma = \left[\left(1.2 - \frac{a}{s} \right) \frac{a}{s} \cos^3 \left(\frac{\pi a}{2s} \right) + 1 \right] \frac{p(D-s+a)}{2(s-a)}. \quad (7)$$

Определение критических величин коэффициента концентрации напряжений и деформаций в локальной зоне

Для определения критических величин концентрации напряжений, воспользуемся критерием норм расчета на прочность [19]

$$(\sigma)_{RV} \text{ или } (\sigma)_{RK} \leq 2R_{p0,2}^T, \quad (8)$$

где $(\sigma)_{RV}$ – размах приведенных напряжений в элементах оборудования, МПа; $(\sigma)_{RK}$ – размах приведенных напряжений в элементах трубопроводов, МПа; $R_{p0,2}^T$ – минимально гарантированное значение предела текучести при температуре эксплуатации, МПа.

Переобозначим напряжения в левой части критерия (7) на максимальные напряжения (σ_{\max}) в локальных зонах утонения ЭКИ. Максимальные напряжения определяем из уравнения (1), следовательно, критерий (8) примет вид

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\text{ном}} \alpha_\sigma \leq 2R_{p0,2}^T, \quad (9)$$

$$\alpha_\sigma \leq \frac{2R_{p0,2}^T}{\sigma_{\text{ном}}}. \quad (10)$$

Введем понятие критического коэффициента концентрации напряжений в локальной зоне $\alpha_\sigma^{\text{кр}}$ при использовании вместо номинальных напряжений максимально допустимых напряжений в аварийном режиме с учетом внутреннего давления и изгибающих моментов [19]. Номинальные напряжения ограничены критерием $1.8[\sigma]$, а допускаемый коэффициент концентрации напряжений примет вид

$$\left[\begin{array}{l} \alpha_\sigma^{\text{кр}} \leq \frac{2R_{p0,2}^T}{1.8[\sigma]} = 1.66; \\ \alpha_\sigma^{\text{кр}} \leq \frac{2R_{p0,2}^T}{1.8[\sigma]} = 2.88 \frac{R_{p0,2}^T}{R_m^T}, \end{array} \right. \quad (11)$$

где R_m^T – минимально гарантированное значение временного сопротивления при температуре эксплуатации; $R_{p0,2}^T$ – минимально гарантированное значение предела текучести при температуре эксплуатации; $[\sigma]$ – допускаемые напряжения.

Используя формулу (6) и критерий (11) определим критическое утонение толщины стенки при аварийном режиме $0,27s$.

Концентратор деформаций (α_ε^*) в упругопластической области, согласно И.А. Биргеру [17], определяется из следующего соотношения:

$$\alpha_\sigma^* \cdot \alpha_\varepsilon^* = (0,8 \div 0,9)\alpha_\sigma^2, \quad (12)$$

где α_σ^* и α_ε^* – концентраторы напряжений и деформаций в упругопластической области.

Множитель $(0,8 \div 0,9)$ зависит от степени упрочнения материала. Концентратор напряжений в упругопластической области ограничен пределом текучести и может быть определен уравнением

$$\alpha_\sigma^* = \frac{R_{p0,2}^T}{\sigma_{ном}}. \quad (13)$$

Действующие напряжения в зоне утонения могут превышать предел текучести в аварийных режимах, поэтому определим критический коэффициент концентрации деформаций. Используя соотношение (12), определим допускаемый коэффициент концентрации деформаций в упругопластической зоне:

$$\alpha_\varepsilon^{*кр} = 0,8 \frac{(\alpha_\sigma^{кр})^2}{\alpha_\sigma^*}. \quad (14)$$

Для аварийной ситуации критический коэффициент концентрации деформаций

$$\left[\begin{array}{l} \alpha_\varepsilon^{*кр} \leq 2,64; \\ \alpha_\varepsilon^{*кр} \leq 4,59 \frac{R_{p0,2}^T}{R_m}. \end{array} \right. \quad (15)$$

Используя формулы (6), (12), (13) и критерий (15) определим критическое утонение толщины стенки при аварийном режиме через коэффициент концентрации деформаций – $0,37s$ (для расчетов принято: внутреннее давление – $11,7$ МПа; предел текучести – 196 МПа; температура среды – 170 °С).

Исходя из полученных результатов по критериям (11) и (15), консервативно использовать критерий концентрации напряжений (15).

Таблица

Значения максимально возможных утонений
[Table. The maximum possible value of thickness]

Вид дефекта [The type of defect]	Локальное утонение [Local thickness]		Трещина [The crack]
Критерий [Criteria]	При $\alpha_\sigma^{кр}$ [α_σ^{cr}]	При $\alpha_\varepsilon^{*кр}$ [α_ε^{*cr}]	Метод НПШ [The method LPC]
Критическая толщина [Critical crack]	$0,27s$	$0,37s$	$0,18s$

В таблице приведены значения максимально возможных утонений, полученных из результатов по критериям (11) и (15) и методом нагрузки пластического шарнира (НПШ) [20] с осевой и кольцевой трещинами в аварийном режиме.

Заключение

Рассмотрены различные формы локальных утонений, которые типичны для трубопроводов, подверженных механизму деградации эрозионно-коррозионного износа: сферическое, обширное и равномерное утонения. На основе полученных данных построена огибающая мастер-кривая (6) для коэффициента концентрации напряжений. Получена формула для оценки прочности с учетом различных форм утонений (7).

Получены критерии критических значений коэффициентов концентрации напряжений (11) и деформаций (15), которые позволяют определять критические значения утонений в аварийном режиме эксплуатации.

Критерии допускаемых значений коэффициентов концентрации напряжений справедливо использовать только в тех случаях, когда значения напряжений в зоне утонения не превышают значений предела текучести, в противном случае необходимо использовать критерии коэффициента концентрации деформаций.

Список литературы

1. Поваров О.А., Томаров Г.В., Жаров В.Н. Эрозия-коррозия элементов турбинных установок насыщенного пара // Теплоэнергетика. 1990. № 12. С. 21–32.
2. Степанов И.А. Мониторинг остаточного ресурса оборудования АЭС по показателям коррозионно-механического износа конструкционных материалов // Теплоэнергетика. 1994. № 5. С. 36–39.
3. Филлипс М. Влияние химической обработки воды и особенностей конструкции на коррозию трубчатых подогревателей питательной воды из углеродистой стали // Энергетические машины и установки. 1969. № 2. С. 42–50.
4. Токохаш С., Хоринутти Т. Гидродинамические силы, вызывающие ударную коррозию входных концов трубок из углеродистой стали в подогревателях высокого давления // Новости зарубежной техники. Вып. 95. Л., 1974. С. 5–25.
5. Wu P.C.S. Pipe wall thinning in US light water reactors // IAEA Vienna: Proceedings of Specialists Meeting Organized by the Inter. Atom. Energy Agency (Vienna, 12–14 September, 1988). 1990. Pp. 41–42.
6. Vivekanand Kain. Flow Accelerated Corrosion: Forms, Mechanisms and Case Studies // Procedia Engineer-

ing. 2014. No. 86. Pp. 576–588. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.083

7. Кузьмин Д.А. Исследование условий обеспечения безопасности главного циркуляционного трубопровода на основе концепции ТПР // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2016. № 5. С. 16–23.

8. Xiaohui Chen, Shuang Fang, Haofeng Chen. Stress concentration factor and fatigue analysis of a lateral nozzle with local wall thinning // Engineering Failure Analysis. July 2019. Vol. 105. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.07.004

9. Fratila Marcu. Considerations on the stresses concentration factor // Journal of Engineering Studies and Research. 2012. Vol. 18. No. 4. DOI: 10.29081/jesr.v18i4.148

10. Shim D.J., Choi J.B., Kim Y.J., Kim J.W., Park C.Y. Assessment of Local Wall Thinned Pipeline Under Combined Bending and Pressure // International Journal of Modern Physics B. January 2012. Vol. 17. No. 8–9. Pp. 1870–1876. DOI: 10.1142/S0217979203019800

11. 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.

12. Великоуваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Миленин А.С., Пивторак Н.И. Оценка работоспособности магистрального трубопровода с локальным утонением стенки при ремонте дуговой наплавкой // Автоматическая сварка. 2015. № 1. С. 22–27.

13. Юрманов Е.В., Юрманов В.А., Гуцин В.Н., Архипов О.П., Шутько К.И., Алешин А.В. Оценка кор-

розионного утонения оборудования и трубопроводов СВБ энергоблока № 3 Смоленской АЭС в условиях эксплуатации до 45 лет // Годовой отчет НИКИЭТ-2018. 2018.

14. 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.

15. Бышева О.И., Фасхутдинов А.А., Хазиахметов М.Ф., Юнусова Ф.Т. Способы оценки остаточного ресурса технологических трубопроводов // Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов. 2015. № 5. С. 137–139.

16. Никулина М.М., Абакаров А.М. Влияние коррозии на напряженное состояние изогнутой трубы // Процессы управления и устойчивость. 2019. № 1. С. 107–111.

17. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: справочник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1979. 702 с.

18. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. 2-е изд. М.: Наука, 1979. 560 с.

19. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок / Госатомнадзор СССР. М.: Энергоатомиздат, 1989. 524 с.

20. Аркадов Г.В., Гетман А.Ф., Родионов А.Н. Надежность оборудования и трубопроводов АЭС и оптимизация их жизненного цикла (вероятностные методы). М.: Энергоиздат, 2010. 424 с.

RESEARCH PAPER

The research of the stress-strain state with local thinning in pipelines and determination of allowable values of concentration stress and strain

Dmitry A. Kuzmin, Anastasia V. Andreenkova*

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

*Andreenkova26@list.ru

Article history:

Received: August 05, 2019

Revised: October 09, 2019

Accepted: October 13, 2019

Abstract

Relevance. The nuclear power plant contains a large number of equipment and pipelines subject to flow acceleration corrosion. As a result of a combination of various parameters – sizes (diameters, wall thickness), operational parameters (internal pressure, temperature), steels and elements types – the number of design cases is tens of thousands, without counting the possible forms of thinning. The process of maintenance and repair at the stations are doing an assessment of the accordance of actual and allowable values of wall thicknesses. The ensuring safe operations of equipment and pipelines have been introduced correction functions for regulatory functions, taking into account the forms of thinning, to determine the permissible thinning. **The aim of the work.** The task is to determine the influence of the forms and types of thinning on the stress-strain state

Dmitry A. Kuzmin, PhD, head of NPP Reliability Division.

Anastasia V. Andreenkova, master's degree, engineer of I category.

and to determine the most critical thinning for straight sections of pipelines subject to flow acceleration corrosion taking into account emergency conditions. **Methods.** The allowable values of stress concentration factors (deformations) of pipelines subject without flow acceleration corrosion was determined taking into account allowable values, the requirements of the federal norms and rules for emergency operating conditions. For researches of the stress concentration coefficients were used the finite element method and analytical methods for various shapes, sizes and depths of thinning. **Results.** A method has been developed, that allows getting the maximum allowable values of stress concentration factors (deformations) for emergency operation, which afford to determine the maximum allowable depth of thinning in emergency conditions – an above criterion. The researches have been carried out definition of the stress concentration factors for local thinning with various types of these thinning. The functions of concentration coefficients depending on the geometric parameters of local thinning wall thickness were determined for a straight section of the pipeline. As a result of the research, the dependences of the sizes of thinning on the concentration coefficients for straight pipelines were created and a master-curve was obtained. The researches were carried out take into account the load from internal pressure and bending moment.

Keywords: pipelines; flow acceleration corrosion; volume thinning, stress concentration coefficient; strength

For citation

Kuzmin D.A., Andreenkova A.V. (2019). The research of the stress-strain state with local thinning in pipelines and determination of allowable values of concentration stress and strain. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(5), 384–391. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-384-391>. (In Russ.)

References

1. Povarov O.A., Tomarov G.V., Zharov V.N. (1990). Eroziya-korroziya elementov turbinnih ustanovok nasyshchennogo para [Erosion-corrosion of elements of turbine units of saturated steam]. *Teploenergetika [Thermal Engineering]*, (12), 21–32. (In Russ.)
2. Stepanov I.A. (1994). Monitoring ostatochnogo resursa oborudovaniya AES po pokazatelyam korroziionno-mekhanicheskogo iznosa konstrukcionnyh materialov [Monitoring the residual life of NPP equipment by indicators of corrosion-mechanical wear of structural materials]. *Teploenergetika [Thermal Engineering]*, (5), 36–39. (In Russ.)
3. Fillips M. (1969). Vliyanie himicheskoy obrabotki vody i osobennostej konstrukcii na korroziyu trubchatyh podogrevatelej pitatel'noj vody iz uglerodistoj stali [The effect of chemical water treatment and structural features on the corrosion of tubular carbon steel feed water heaters]. *Energeticheskie mashiny i ustanovki [Power machines and installations]*, (2), 42–50. (In Russ.)
4. Tokohash S., Horinuti T. (1974). Gidrodinamicheskie sily, vyzvyvayushchie udarnuyu korroziyu vhodnyh koncov trubok iz uglerodistoj stali v podogrevatelyah vysokogo davleniya [Hydrodynamic forces causing shock corrosion of carbon steel inlet ends in high pressure heaters]. *Novosti zarubezhnoj tekhniki [News of foreign technology]*, (95), 5–25. (In Russ.)
5. Wu P.C.S. (1990). Pipe wall thinning in US light water reactors. *IAEA Vienna: Proceedings of Specialists Meeting Organized by the Inter. Atom. Energy Agency (Vienna, 12–14 September 1988)* (pp. 41–42).
6. Vivekanand Kain. (2014). Flow Accelerated Corrosion: Forms, Mechanisms and Case Studies. *Procedia Engineering*, (86), 576–588. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.083
7. Kuz'min D.A. (2016). 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*, (5), 16–23. (In Russ.)
8. Xiaohui Chen, Shuang Fang, Haofeng Chen. (2019). Stress concentration factor and fatigue analysis of a lateral nozzle with local wall thinning. *Engineering Failure Analysis*, 105. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.07.004
9. Fratila Marcu. (2012). Considerations on the stresses concentration factor. *Journal of Engineering Studies and Research*, 18(4). DOI: 10.29081/jesr.v18i4.148
10. Shim D.J., Choi J.B., Kim Y.J., Kim J.W., Park C.Y. (2012). Assessment of Local Wall Thinned Pipeline Under Combined Bending and Pressure. *International Journal of Modern Physics B*, 17(8–9), 1870–1876. DOI: 10.1142/S0217979203019800
11. Pástor M., Frankovský P., Hagara M., Lengvarský P. (2018). The use of optical methods in the analysis of the areas with stress concentration. *Journal of Mechanical Engineering*, 68(2), 61–76.
12. Velikoivanenko E.A., Rozyinka G.F., Milenin A.S., Pivtorak N.I. (2015). Ocenka rabotosposobnosti magistral'nogo truboprovoda s lokal'nym utoneniem stenki pri remonte dugovoj naplavkoj [Performance assessment of the main pipeline with local thinning of the wall during repair by arc surfacing]. *Avtomaticheskaya svarka*, (1), 22–27. (In Russ.)
13. Yurmanov E.V., Yurmanov V.A., Gushchin V.N., Arhipov O.P., Shut'ko K.I., Aleshin A.V. (2018). Ocenka korroziionnogo utoneniya oborudovaniya i truboprovodov SVB energobloka No. 3 Smolenskoj AES v usloviyah ekspluatatsii do 45 let [Assessment of corrosion thinning of equipment and pipelines of important systems for the safe-

ty of Unit 3 of Smolensk NPP under operating conditions up to 45 years]. *Godovoj otchet NIKIET-2018*. (In Russ.)

14. Tomarov G.V., Spirkov A.A., Komissarova T.N. (2019). Lokal'naya eroziya-korroziya svarnyh soedinenij truboprovodov energoblokov AES: osobennosti mekhanizma i preduprezhdenie povrezhdenij [Local erosion-corrosion of welded joints of pipelines of NPP power units: mechanism features and damage prevention]. *Teploenergetika*, (2), 76–86. (In Russ.)

15. Byvsheva O.I., Faskhutdinov A.A., Haziakhmetov M.F., Yunusova F.T. (2015). Sposoby ocenki ostatochnogo resursa tekhnologicheskikh truboprovodov [Methods of estimation of residual resource of technological pipelines]. *Ekspertiza promyshlennoj bezopasnosti i diagnostika opasnyh proizvodstvennyh ob'ektov* [Examination of industrial safety and diagnostics of hazardous production facilities], (5), 137–139. (In Russ.)

16. Nikulina M.M., Abakarov A.M. (2019). Vliyanie korrozii na napryazhennoe sostoyanie izognutoj truby [Influence of corrosion on the stress state of a bent pipe]. *Processy upravleniya i ustojchivost'*, (1), 107–111. (In Russ.)

17. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. (1979). *Raschet na prochnost' detalej mashin: spravochnik. 3-e izd., pererab. i dop.* [Calculation of the strength of machine parts: reference book. 3rd ed.]. Moscow, Mashinostroenie Publ. (In Russ.)

18. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. (1979). *Teoriya uprugosti. 2-e izd.* [Theory of elasticity. 2nd ed.]. Moscow, Nauka Publ. (In Russ.)

19. PNAE G-7-002-86. *Normy rascheta na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov atomnyh energeticheskikh ustanovok* [Norms of calculation for strength of equipment and pipelines of nuclear power plants]. (1989). Gosatomnadzor SSSR. Moscow, Energoatomizdat Publ. (In Russ.)

20. Arkadov G.V., Getman A.F., Rodionov A.N. (2010). *Nadezhnost' oborudovaniya i truboprovodov AES i optimizatsiya ikh zhiznennogo tsikla (veroyatnostnye metody)* [The reliability of the equipment and pipelines of nuclear power plants and optimisation of their life cycle (probabilistic methods)]. Moscow: Energoizdat Publ. (In Russ.)