



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

2011, ТОМ 17, НОМЕР 3, 185–190

УДК 624.014.2:620.193

(11)-0244-0

НАДІЙНІСТЬ СТАЛЕВИХ ТРУБОПРОВОДІВ ПРИ ВИПАДКОВІЙ ШВИДКОСТІ КОРОЗІЇ

О. В. Семко, О. П. Воскобийник, А. В. Гасенко, Ж. Ю. Бескровна

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка,

Першотравневий пр., 24, м. Полтава, Україна, 36011.

E-mail: Syom@mail.ru

Отримана 8 червня 2011; прийнята 24 червня 2011.

Анотація. У статті розглянуто надійність сталевих трубопроводів при випадковій швидкості корозії. В роботі використовувалась експонентна функціональна залежність математичної моделі корозії. Вона дозволяє оцінити надійність елементу в умовах рівномірної корозії при нормальному законі розподілу випадкової величини початкової швидкості корозії. Для аналізу показників надійності розглядалась ділянка магістрального трубопроводу при дії внутрішнього тиску і корозії. На основі цієї моделі побудовано графік зміни рівня надійності в часі для трубопроводів діаметром 820, 1 020 і 1 220 мм із товщиною стінки 8 мм. Отримана залежність показала, що трубопроводи з меншим діаметром зберігають вищий рівень надійності, ніж трубопроводи з більшим діаметром впродовж 50 років експлуатації.

Ключові слова: сталевий трубопровід, корозійні пошкодження, надійність.

НАДЕЖНОСТЬ СТАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ СЛУЧАЙНОЙ СКОРОСТИ КОРРОЗИИ

А. В. Семко, Е. П. Воскобойник, А. В. Гасенко, Ж. Ю. Бескровная

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка,

Первомайский пр., 24, г. Полтава, Украина, 36011.

E-mail: Syom@mail.ru

Получена 8 июня 2011; принята 24 июня 2011.

Аннотация. В статье рассмотрена надежность стальных трубопроводов при случайной скорости коррозии. В работе использовалась экспонентная функциональная зависимость математической модели коррозии. Она позволяет оценить надежность элемента в условиях равномерной коррозии при нормальном законе распределения случайной величины начальной скорости коррозии. Для анализа показателей надежности рассматривался участок магистрального трубопровода при действии внутреннего давления и коррозии. На примере этой модели построен график изменения уровня надежности во времени для трубопроводов диаметром 820, 1 020 и 1 220 мм с толщиной стенки 8 мм. Полученная зависимость показала, что трубопроводы с меньшим диаметром сохраняют уровень надежности выше, чем трубопроводы с большим диаметром на протяжении 50 лет эксплуатации.

Ключевые слова: стальной трубопровод, коррозионные повреждения, надежность.

RELIABILITY OF STEEL PIPES AT A RANDOM RATE OF CORROSION

Semko Aleksander, Voskobiinyk Olena, Gasenko Anton, Beskrovna Zhanna

Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk,

24, Pershotravnevyi Av., Poltava, Ukraine, 36011.

E-mail: Syom@mail.ru

Received 8 June 2011; accepted 24 June 2011.

Abstract. This article examines the reliability of steel pipes at a random rate of corrosion. A functional exponent relationship of mathematical models of corrosion has been used. It allows to assess the reliability of the element in terms of uniform corrosion under normal law of distribution of the random variable of the initial rate of corrosion. Using this model a diagram of change of the level of reliability during the time for the pipeline diameter of 820, 1 020 and 1 220 mm with a wall thickness of 8 mm is done. The dependence obtained showed that the smaller diameter pipes retain higher levels of reliability than with a large diameter pipelines for over 50 years of operation.

Keywords: steel pipe, corrosion damage, the reliability.

Вступ

Забезпечення надійності технічних споруд транспортування рідин та газів є невід'ємною вимогою до безпечної їх експлуатації. Зниження надійності та довговічності таких систем під час їх експлуатації відбувається при виникненні пошкоджень та дефектів частин конструкцій [3, 6, 7]. Під дефектом розуміють кожну окрему невідповідність конструкції вимогам, встановлених нормативною документацією. Одним з головних і неминучих пошкоджень сталевих конструкцій є корозія. Кожний рік 10...12% виплавленого та експлуатованого металу втрачається внаслідок руйнуючої дії корозії [1]. Розвиток методики нормування впливу корозійного зносу на несучу здатність та термін експлуатації конструкції можливий при подальшому розвитку теорії надійності будівельних конструкцій у поєднанні з інженерним досвідом [3, 8]. Розрахунок конструкцій з урахуванням корозійного зносу ускладнюється стохастичним ненормованим характером проходження процесу корозії.

Аналіз останніх досліджень

У звичайних умовах експлуатації метал конструкцій нестійкий: навіть у відносно чистому повітрі сільської місцевості він покривається іржею [2]. Швидкість корозії у залежності від

ступеня агресивності навколишнього середовища змінюється від 0,05 до 1,60 мм/рік [1]. Розрізняють різні типи корозії у залежності від зміни внутрішньої структури металу. Головні з них – рівномірна, нерівномірна, місцева, піттингова, точкова корозії, корозійне розтріскування. Під дією корозії елементи конструкції втрачають початкову площу, тобто перестають відповідати встановленим на під час виготовлення вимогам до експлуатації.

Оцінка довговічності конструкцій суттєвим чином залежить від правильності вибору моделі, здатної відобразити вплив агресивного середовища на основні процеси, що протікають в структурі металу. У найбільш загальній постановці процеси зносу представляються у вигляді нестационарних випадкових функцій часу [4, 5]. Основні засади розрахунку та оцінювання надійності будівельних конструкцій були започатковані в роботах [9, 10]. Розрахунок надійності елементів кільцевого перерізу із заданою початковою товщиною стінки, що піддається корозійному зносу при випадковому характеру механічних властивостей, досить детально викладений в [3]. Також тут розглядається кругова циліндрична оболонка як ділянка магістрального трубопроводу при дії внутрішнього тиску та корозії. Встановлено, що напруження розтягу прискорюють розвиток корозії.

У даній роботі за **мету** ставиться дослідження зміни надійності експлуатованих трубопроводів різних діаметрів при використанні експонентної функціональної залежності математичної моделі корозії, що дозволяє оцінити надійність елементу в умовах рівномірної корозії при нормальному законі розподілу випадкової величини початкової швидкості корозії.

Надійність при рівномірному корозійному зносі

Розглядається ділянка магістрального трубопроводу при дії внутрішнього тиску і корозії. Внутрішній тиск і механічні властивості матеріалу вважаються випадковими величинами із заданим законом розподілу. В якості критерію граничного стану по міцності при оцінці надійності прямолінійних елементів лінійної частини приймається умова:

$$\sigma_{екв} \leq R_y, \quad (1)$$

де $\sigma_{екв}$ – еквівалентні напруження від зовнішнього навантаження і впливів об'ємного напружено-деформованого стану трубопроводу; R_y – розрахунковий опір сталі трубопроводу.

У відповідності з гіпотезою Губера-Мізеса:

$$\sigma_{екв} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{кц} - \sigma_{пр})^2 + (\sigma_{пр} - \sigma_{позд})^2 + (\sigma_{кц} - \sigma_{позд})^2}. \quad (2)$$

В нашому випадку:

$$\sigma_{кц} = \frac{pD_{вн}}{2t} - \text{кільцеві напруження};$$

$$\sigma_{пр} = 0 - \text{поперечні напруження};$$

$$\sigma_{позд} = \frac{pD_{вн}}{4t} - \alpha_1 E \Delta \theta - \text{поздовжні напруження},$$

де p – внутрішній (робочий) тиск; $\Delta \theta$ – температурний перепад – різниця температури експлуатації і температури, при якій проводиться монтаж трубопроводу; α_1 – коефіцієнт лінійного розширення при нагріванні; t – товщина стінки трубопроводу; $D_{вн}$ – внутрішній діаметр трубопроводу.

Оскільки при визначенні поздовжніх напружень ($\sigma_{позд}$) в даній роботі не враховували температурного перепаду, то $\sigma_{позд} = pD_{вн}/4t$.

Підставляючи в формулу (2) значення напружень, що діють в сталевій оболонці у трьох взаємно перпендикулярних напрямках, отримуємо:

$$\begin{aligned} \sigma_{екв} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\left(\frac{pD_{вн}}{2t} - 0\right)^2 + \left(0 - \frac{pD_{вн}}{4t}\right)^2 + \left(\frac{pD_{вн}}{2t} - \frac{pD_{вн}}{4t}\right)^2} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{p^2 D_{вн}^2}{4t^2} + \frac{p^2 D_{вн}^2}{16t^2} + \frac{p^2 D_{вн}^2}{16t^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{6p^2 D_{вн}^2}{16t^2}} = \\ &= \frac{pD_{вн}}{t} \sqrt{\frac{6}{32}} = \frac{\sqrt{3} pD_{вн}}{4t}. \end{aligned}$$

Серед зазначених напружень ($\sigma_{кц}$, $\sigma_{пр}$, $\sigma_{позд}$, $\sigma_{екв}$) найбільшими є кільцеві напруження $\sigma_{кц}$. Із урахуванням вище сказаного умова безвідмовної роботи запишеться в наступному вигляді:

$$\sigma = \frac{pD_{вн}}{2t} \leq R_y. \quad (3)$$

Вважається, що корозійний процес викликає зменшення товщини стінки трубопроводу t в часі за законом $t = t_0 \cdot \varphi(t)$. До функції $\varphi(t)$ задовольняє наступні умови:

$$\phi(0) = 1; \quad \phi(\infty) = 0; \quad \phi(t) > 0; \quad \phi'(t) < 0.$$

Оцінка довговічності конструкцій значним чином залежить від правильності вибору моделі, здатної відобразити вплив агресивного середовища на протікаючі в структурі металу процеси [3].

Відомо, що корозійний знос елементів конструкції, що працюють в агресивних середовищах, завжди починається з поверхневих шарів та суттєво залежить від їх стану. Прокородовані елементи мають дуже окислену, рихлу поверхню. У зоні розрихлення окремі каверни чи язви проникають на значну глибину. Збільшення глибини окисленого шару металу дуже знижує несучу здатність конструкції.

Для моделювання корозійних процесів важливі характеристики: параметру пошкоженості, у якості якого може прийматися глибина шару металу δ , що руйнується, або швидкість корозії v_i ($v_i = d\delta / dt$) математичної моделі корозії, що пов'язує параметр пошкоженості з фізико-хімічними характеристиками зовнішнього середовища; напружено-деформованого стану конструкції, що взаємодіє з агресивним середовищем.

Функція $\varphi(t)$ може бути задана у вигляді формули $\varphi(t) = \exp(-1/\tau)$, де параметр зносу τ являє собою випадкову величину із законом розподілу $p_\tau(x)$. Зміна радіуса труби:

$$\rho = r_2 - (r - r_2) \cdot \phi(t).$$

Звідси при $r = r_2$, $\rho = r_2$ і при $r = r_1$,

$$\rho = r_2 + (r_1 - r_2) \cdot \varphi(t).$$

Умова безвідмовної роботи приймається у вигляді

$$\sigma = p[r_2 + (r_1 - r_2) \cdot \varphi(t)]^2 / [(r_1 - r_2) \cdot \varphi(t)] \leq R_y$$

або

$$p \leq 2R_y t_0 \varphi(t) / [2r_2 + t_0 \varphi(t)].$$

Умовна ймовірність неруйнування при фіксованих значеннях R_y і τ дорівнює:

$$P(R_y \tau) = P\{2R_y t_0 \varphi(t) / [2r_2 + t_0 \varphi(t)]\}.$$

Передбачається, що для випадкової величини тиску статистичні дані відносяться до деякого вибраного періоду часу, наприклад, місяця або року, і з отриманих спостережень відібрані максимальні значення. Якщо цей період часу великий у порівнянні з зоною кореляції, то в якості закону розподілу можна вибрати розподіл екстремальних значень. Так, для екстремальних значень p приймається розподіл Фішера-Типшета (розподіл II типу).

$$P(x) = \exp[-(x/u)^{-\nu}].$$

Умовна функція надійності для конструкцій при експлуатації її за n років, при $R_y = const$.

$$P(R_y \tau) = \prod_{i=1}^n \exp\{-2R_y t_0 \varphi(i) / [2r_2 + t_0 \varphi(i)] u\}^{-\nu}. \quad (4)$$

Тут процес корозії наближено представляється ступінчастим по роках.

Тоді безумовна функція надійності при випадковому характері значення межі текучості матиме вигляд:

$$P(\tau) = \int_0^{\infty} P(R_y \tau) dP_{R_y}(x). \quad (5)$$

В якості функції розподілу $P_{R_y}(x)$ для R_y був прийнятий закон Вейбула:

$$P(n) = \int_0^{\infty} P_{\tau}(x_1) p_{\tau}(x_1) dx_1. \quad (6)$$

Підставивши в формулу (6) попередні вирази (4) і (5), отримуємо:

$$P(n) = \frac{\varepsilon}{\omega} \int_0^{\infty} \prod_{i=1}^n \exp\{-2x t_0 \varphi(i) / [2r_2 + t_0 \varphi(i)] u\}^{-\nu} \exp[-\frac{x}{\omega}] (\frac{x}{\omega})^{\varepsilon-1} p_{\tau}(x_1) dx dx_1.$$

Знання закону розподілу $p_{\tau}(x_1)$ для випадкової величини τ , а також параметрів розподілу u, ν, ε і ω дозволяє визначити і оцінити функцію надійності для трубопроводу, що експлуатується років в агресивному середовищі.

За допомогою експонентної моделі корозії $\delta = \delta_k \cdot [1 - \exp(-t/\tau)]$ порахована зміна рівня надійності в часі для трубопроводів діаметром 820, 1 020 і 1 220 мм із товщиною стінки 8 мм, навантажених номінальним тиском весь період експлуатації. Отримана залежність показана на рис.

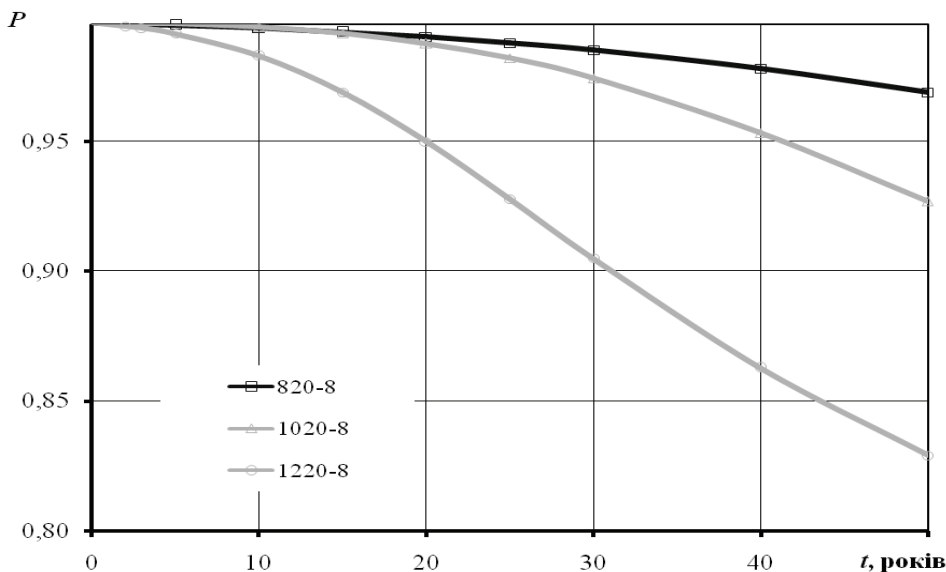


Рисунок. Графік зміни рівня надійності при випадковій швидкості корозії від часу для трубопроводів.

Із отриманої залежності видно, що трубопроводи з меншим діаметром зберігають вищий рівень надійності, ніж трубопроводи з більшим діаметром впродовж 50 років експлуатації.

Висновки

Надійність сталевих елементів при рівномірному корозійному зносі, яку можна визначити по експонентній функціональній залежності ма-

тематичної моделі корозії, залежить від початкової товщини елемента, значення границі текучості матеріалу, початкової швидкості корозії. Використовуючи таку залежність, виявлено, що трубопроводи з меншим діаметром (820 мм) зберігають вищий рівень надійності, ніж трубопроводи з більшим діаметром (1 220 мм) впродовж 50 років експлуатації при однаковій початковій товщині стінки труби (8 мм).

Література

1. Оцінка технічного стану сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд, що знаходяться в експлуатації : ДБН 362–92. – Введ. 1992–07–01. – К. : Укрархбудінформ, 1995. – 46 с.
2. Експлуатаційні властивості і захист від корозії будівельних металоконструкцій: Розробки і практичний досвід забезпечення довговічності: Прес-досвід НВВЛ «Антикор–Дон» Донбаської національної академії будівництва і архітектури / В. П. Корольов (ред.), О. М. Гібаленко (уклад.). – Донецьк : Норд–Пресс, 2005. – 45 с.
3. Райзер, В. Д. Расчет и конструирование надежности строительных конструкций / В. Д. Райзер. – М. : Стройиздат, 1995. – 352 с.
4. Югов, А. М. Технічна діагностика та оцінка залишкового ресурсу експлуатованих металевих конструкцій : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук / Югов А. М. – Макіївка, 2004. – 36 с.
5. Семко, О. В. Надійність стиснутих сталевих елементів з швелерів при корозійному зносі / О. В. Семко, А. В. Гасенко // Металеві конструкції. – 2006. – Т. 11, № 3. – С. 197–202.
6. Рекомендации по оценке работоспособности участков газопроводов с поверхностными повреждениями. – М. : ВНИИГАЗ, 1996. – 18 с.
7. ANSI/ASME B31G Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines.
8. Защита трубопроводов от коррозии : учеб. пособие. Том 1 / Ф. М. Мустафин, М. В. Кузнецов, Г. Г. Васильев [и др.]. – СПб. : Недра, 2005. – 620 с.
9. Ржаницын, А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / А. Р. Ржаницын. – М. : Стройиздат, 1978. – 239 с.
10. Болотин, В. В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений / В. В. Болотин. – М. : Стройиздат, 1971. – 255 с.

References

1. Building Norms and regulations. Evaluation of the technical state of steel structures of industrial buildings and facilities in operation: DBN 362–92. Kyiv: Ukrarhbudinform, 1995. 46 p. (in Ukrainian).
2. Operation features and rust defense of building metal structures: developments and practical experience of durability providing: press files of NVVL «Anticor–Don» of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture / V. P. Korolov (ed.), O. M. Gibalenko (ed.). Donetsk: Nord–Press, 2005. 45 p. (in Ukrainian)
3. Rayzer, V. D. Design and constructing of reliability of building structures. Moscow: Stroiizdat, 1995. 352 p. (in Russian)
4. Yugov, A. M. Technical diagnostics and estimation of residual resource of exploited metal structures: author's abstract of Ph. D. thesis. Makiivka, 2004. 36 p. (in Ukrainian)
5. Semko, O. V.; Gasenko, A. V. Reliability of stressed steel elements of channels with corrosive wear. *Metal Constructions*, 2006, Vol. 11, No. 3, p. 197–202. (in Ukrainian)
6. Guidelines for assessing the work stations with gas superficial injuries. Moscow: Stroiizdat, VNIIGAZ, 1996. 18 p. (in Russian)
7. ANSI/ASME B31G Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines.
8. Mustafin, F. M.; Kuznetsov, M. V.; Vasilev, G. G. et al. Protection of pipelines against corrosion: School book. Tom 1. St. Petersburg: Nedra, 2005. 620 p. (in Russian)
9. Rzhantsin, A. P. The theory of calculation of building structures on the reliability. Moscow: Stroiizdat, 1978. 239 p. (in Russian)
10. Bolotin, V. V. Application of the methods of probability theory and reliability theory in the calculation of structures. Moscow: Stroiizdat, 1971. 255 p. (in Russian)

Семко Олександр Володимирович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри архітектури і міського будівництва Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Наукові інтереси: страхові ризики у будівництві, технічна експлуатація, сталезалізобетонні конструкції.

Воскобийник Олена Павлівна – кандидат технічних наук, докторант кафедри конструкцій із металу, дерева і пластмас Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Старший науковий співробітник. Наукові інтереси: розвиток методики оцінки надійності елементів будівельних конструкцій, оцінка технічного стану та проектування сталезалізобетонних конструкцій, участь в розробці будівельних норм проектування.

Гасенко Антон Васильович – кандидат технічних наук, доцент кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій та опору матеріалів Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Наукові інтереси: проектування, участь в розвитку методів розрахунку на міцність, жорсткість і стійкість, оцінка надійності стиснутих сталобетонних конструкцій з урахуванням експлуатаційних пошкоджень.

Бескровна Жанна Юрївна – аспірант кафедри конструкцій з металу, дерева і пластмас Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Наукові інтереси: надійність магістральних трубопроводів, технічна експлуатація.

Семко Олександр Володимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой архитектуры и городского строительства Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка. Научные интересы: страховые риски в строительстве, техническая эксплуатация, сталежелезобетонные конструкции.

Воскобойник Елена Павловна – кандидат технических наук, докторант кафедры конструкций из металла, дерева и пластмассы Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка. Старший научный сотрудник. Научные интересы: развитие методики оценки надежности элементов строительных конструкций, оценка технического состояния и проектирование сталежелезобетонных конструкций, участие в разработке строительных норм проектирования.

Гасенко Антон Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций и сопротивления материалов Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка. Научные интересы: проектирование, участие в разработке методов расчета на прочность, жесткость и стойкость, оценка надежности сжатых сталобетонных конструкций с учетом эксплуатационных повреждений.

Бескровная Жанна Юрьевна – аспирант кафедры конструкций из металла, дерева и пластмассы Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка. Научные интересы: надежность магистральных трубопроводов, техническая эксплуатация.

Semko Alexander – D. Sc (technical), professor, Head of the department Architecture and Municipal Economy of the Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk. Scientific interests: the insurance risks in construction, technical operation, composite steel and concrete construction.

Voskobiinyk Olena – Ph. D. (technical), working for doctor's degree at the department Metallic, Timber and Plastic Constructions of the Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk. Senior research worker. Scientific interests: development of method of reliability estimations of building constructions elements, determination of the technical state and design of steel and reinforced concrete composite structures, participation in development of building norms of design.

Gasenko Anton – is a candidate of engineering sciences, associate professor of department Reinforce-concrete Constructions and Resistance of Materials of the Poltava National Technical University of the name of Yuri Kondratyuka. Scientific interests: planning, participating in development of methods of calculations on durability, inflexibility and firmness, estimation of reliability of compressed permanent reinforce-concrete constructions taking into account operating damages.

Beskrovna Zhanna – is a graduate student of department of Constructions from a Metal, Tree and Plastics of the Poltava national Technical University of the name of Yuri Kondratyuka. Scientific interests: reliability of main pipelines, technical operation.