

УДК 622.648

П.Д. СЕСПЕДЕС ГАРСІЯ\*

## ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМОСТІ ДЕФЕКТУ КОРОЗІЙНОГО ЗНОСУ МЕТАЛУ ТА ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ КОРОДОВАНИХ ТРУБОПРОВОДІВ НА АЕС

\*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

**Анотація.** Оскільки у сфері ядерної енергетики існує необхідність в оцінюванні ризику пошкоджень ерозійно-корозійного зносу (ЕКЗ) трубопровідних систем, ключовою задачею статті є вирішення конкретних питань, пов'язаних із визначенням допустимості глибини дефекту ЕКЗ металу стінки трубопроводів на АЕС та оцінкою їх залишкового ресурсу. Опрацьовано метод обчислення граничних значень глибин стоншення стінки трубопроводу внаслідок корозії за встановленою Національною атомною енергогенеруючою компанією «Енергоатом» методологією та з використанням нормативних і рекомендаційних документів на проєктування трубопроводів. Використання методики демонструє певні переваги з точки зору оцінки ЕКЗ і придатності об'єкта до експлуатації, а саме пониження вимог до мінімально допустимої товщини стінки трубопроводів із корозійним дефектом, особливо для стоншень невеликих розмірів, що дозволяє скоротити об'єми запланованих ремонтних робіт. На практиці застосування методики може спричинити труднощі через її складність та трудомісткість процедур розрахункової оцінки граничних значень. У роботі проведено приклад обчислення залишкового ресурсу дефектних трубопровідних систем на АЕС із використанням імовірнісно-фізичного підходу до оцінки технічного стану цих об'єктів. Для цього було використано ймовірнісно-фізичну модель надійності у вигляді дифузійного монотонного розподілу (DM-розподілу) відмов, параметри якої мають фізичну інтерпретацію у вигляді коефіцієнта та варіації узагальненого процесу деградації та середньої швидкості зміни визначального параметра. Як визначальний параметр прийнято мінімально допустиму товщину стінки трубопроводу в умовах впливу ЕКЗ, яку було визначено в результаті обчислень вищезгаданої методики та додаткових розрахунків із використанням супровідних нормативних документів.

**Ключові слова:** трубопровідні системи АЕС, ерозійно-корозійний знос, залишковий ресурс, ймовірнісно-фізична модель надійності, DM-розподіл.

**Abstract.** Since in the field of nuclear energy, there is a need to assess the risk of erosion-corrosion wear (ECW) in pipelines, the key task of the article is to solve specific issues related to determining the admissibility of the depth caused by ECW defects in the metal walls of pipelines at nuclear power plants and estimate their residual life. A method for calculating the threshold values of wall thickness reduction depths in pipelines caused by corrosion has been processed in accordance with the established methodology adopted by the National Nuclear Energy Generating Company «Energoatom» and additionally, by incorporating regulatory and recommended documentation for pipeline design. The use of the methodology demonstrates certain advantages in terms of assessing erosion-corrosion wear and the fitness of the object for operation, specifically by reducing the requirements for the minimum permissible wall thickness of pipelines with a corrosion defect, especially for small-sized thinning, allowing for a reduction in the planned repair work volumes. In practice, the implementation of the methodology can pose difficulties due to its complexity and time-consuming nature of the procedures for calculating limit values. The paper provides an example of calculating the residual resource of defective pipeline systems at nuclear power plants using a probabilistic-physical approach to assess the technical condition of these objects. For this purpose, a probabilistic-physical reliability model was employed in the form of a diffusion monotonic distribution (DM-distribution) of failures. Its parameters are interpreted physically as the coefficient of variation for the generalized degradation process and the mean rate of the defining parameter. The defining parameter is considered to be the minimum allowable wall thickness of the pipeline under the influence of erosion-corrosion wear, which was determined as a result of calculations using the above-mentioned methodology and additionally by incorporating accompanying regulatory documents.

## 1. Вступ

Такі умови, як висока вологість, електропровідність, а також лужність чи кислотність оточуючого сталевий трубопровід середовища, значно збільшують імовірність виникнення корозії в трубопроводах. Також із часом ґрунт, де розташовані трубопроводи, може надмірно зсуватися чи осідати, що істотно збільшує навантаження на підземних ділянках трубопроводів і сприяє виникненню серйозних тріщин та пошкоджень. Саме тому актуальною задачею є перевірка технічного стану та визначення залишкового ресурсу підземних трубопровідних систем [1, 2].

Зношення трубопроводів і обладнання, виготовлених зі сталі, через ерозійно-корозійні процеси є однією з найпоширеніших причин їх пошкоджень. Зазвичай ці види пошкоджень спричиняють виникнення отворів, проте у процесі експлуатації АЕС трапляються й більш серйозні руйнування.

У звичайному режимі експлуатації трубопроводу відбувається втрата товщини стінок у певних місцях через зношення матеріалу труби, в той час, як в інших місцях товщина збільшується через відкладення продуктів корозії на стінці труби. Стоншення викликають зменшення міцності матеріалу, відповідно потовщення товщини ускладнює рух течії.

У сфері ядерної енергетики завжди присутня необхідність в оцінюванні ризику розрахункових (потенціальних) або фактичних ерозійно-корозійних дефектів зносу в трубопровідних системах. Тому у цій статті буде опрацьовано метод визначення допустимої товщини стінок трубопроводів із сталі, що були підвержені ЕКЗ. Це дозволить систематично оцінювати результати експлуатаційного контролю дефектів у трубопроводі й дає можливість розглядати об'єкт для подальшої експлуатації до наступної перевірки, використовуючи підтвержені розрахунки.

У 2018 році в ДП «НАЕК «Енергоатом» впровадило методику оцінки пошкодження ділянки трубопроводу з ЕКЗ [1]. Методика визначає процедуру оцінки рівня ризику аварії від ЕКЗ шляхом порівняння показників ЕКЗ, що вимірюються, із критеріальними значеннями і розрахунками мінімальної товщини стінки трубопроводу.

Оцінка допустимості ЕКЗ проводиться на початковому етапі, враховуючи довжину та глибину стоншення. Цей процес дозволяє визначити, чи можна допустити ділянку до подальшої експлуатації, чи вона повинна бути відправлена на ремонт або на додаткову деталізовану оцінку, використовуючи внутрішні ресурси персоналу АЕС або з залученням спеціалізованих організацій. Отримані результати порівнюються з фактичними значеннями геометричних та експлуатаційних параметрів трубопроводу, щоб зробити остаточний висновок щодо допустимості ділянки з ЕКЗ до подальшої експлуатації або визначити необхідність проведення її ремонту. Результати аналізу свідчать, що використання вищезазначеної методики зменшує вимоги до допустимої товщини стінки трубопроводів із дефектами ЕКЗ, що, у свою чергу, знижує обсяги ремонтних робіт [1].

Суттю досліджуваної методики і в цілому цього підходу є проведення розрахункового аналізу цілісності трубопроводу з дефектами ЕКЗ шляхом аналітичних обґрунтувань та розрахунків і визначення допустимості товщини стінок трубопроводу з дефектами ЕКЗ, враховуючи фактичні та номінальні геометричні характеристики та фізико-механічні властивості матеріалу трубопроводу.

*Мета роботи* полягає в оцінці максимально допустимого рівня зносу товщини стінок трубопроводу з корозійним дефектом, а також опрацюванні ймовірно-фізичного методу для визначення залишкового ресурсу за допомогою *DM*-розподілу відмов, викорис-

товуючи значення середньої швидкості зміни визначального параметра, значення граничного стану стоншення стінок трубопроводу внаслідок ЕКЗ [1] та значення коефіцієнта варіації узагальненого процесу деградації [3].

## 2. Розрахунок граничного значення допустимої товщини стінки трубопроводу

Відповідно до положень методики, приймається збільшення напружень на 10%, які відповідають допустимому стану. Мінімально допустима товщина стінки в зоні локального стоншення може становити значення 30% від  $s$  (номінальна товщина стінки). Ці положення узгоджуються з закордонними нормативними документами визначення мінімально допустимих стінок трубопроводів [1]. Тому під час проведення оцінки нижню межу розглядають одночасно з урахуванням умови  $\max\{s_{\min}; 0,3s\}$ . Таку умову визначено з метою уникнення ситуації, коли геометричні параметри трубопроводу, механічні характеристики матеріалу, внутрішній тиск і температура стають такими, що в результаті розрахунків значення  $s_{\min}$  буде менше 30% від номінальної товщини стінки бездефектного трубопроводу.

Згідно з методикою, оцінка ЕКЗ проводиться відповідно до підходу визначення граничного пластичного стану матеріалу трубопроводу, враховуючи глибину  $a$  та довжину  $L$  стоншення стінки. Оцінка ЕКЗ зводиться до порівняння найменшої визначеної товщини стінки трубопроводу, виявленої під час контролю ( $s_{\min}$ ) із критеріальним значенням мінімально допустимої товщини  $s_{\text{ниж}}$  (нижня границя), який визначається за умовою

$$\alpha(s_R) = 0,9, \quad (1)$$

де  $\alpha(s_R)$  – коефіцієнт зниження міцності труби з дефектом ерозійно-корозійного зносу:

$$\alpha(s_R) = (1 + A_R \cdot B_W \cdot B_S) / (1 + A_R \cdot B_S), \quad (2)$$

$$A_R = 4/3 \cdot (0,5L / \sqrt{R_m s_R})^2, \quad (3)$$

$$B_W = (\ln(R_2 / R_a) + W) / \ln(R_2 / R_1), \quad (4)$$

$$B_S = (R_1 / s)(\ln(R_2 / R_1) - \ln(R_2 / R_a) - W), \quad (5)$$

де  $L_{\max}$  – макс. довжина ЕКЗ у повздожньому напрямку;

$s$  – номінальна товщина стінки трубопроводу;

$R_m$  – середній радіус елемента;

$R_1$  – внутрішній радіус;

$R_2$  – зовнішній радіус;

$R_a = R_1 + a$ ,

де  $a$  – макс. глибина корозійного зносу.

Розрахункова товщина стінки прямолінійної ділянки трубопроводу без ЕКЗ (відповідно до галузевих норм в атомній енергетиці [1]):

$$s_R = (P \cdot D) / (2|\sigma| + P), \quad (6)$$

де  $P$  – внутрішній тиск;

$D$  – зовнішній діаметр;

$|\sigma|$  – номінальна допустима напруга.

$$W = s_R^2(1 - \alpha^2(s_R)) / [4(2R_1 + a)(R_1 + a/2 + s_R/2)]. \quad (7)$$

Під довжиною дефекту стоншення в методиці приймається так звана еквівалентна довжина  $L_{екв}$  вздовж осі елемента трубопроводу, що визначається за допомогою максимального значення протяжності корозійного дефекту  $L_{max}$  [1]:

$$L_{екв} = (2L_{max}) / \pi . \quad (8)$$

При оцінці допустимості ЕКЗ використовується «одична» довжина дефекту, яка визначається як  $L1 = \sqrt{R \cdot s}$ , де  $R$  – радіус трубопроводу, а  $s$  – товщина стінки. Проведемо розрахунок нижньої границі допустимої товщини стінки прямолінійної ділянки трубопроводу з матеріалу «Сталь 20» у місці стоншення з використанням методики для стоншення одичної довжини  $L1 = \sqrt{R \cdot s}$ , при номінальному розмірі труби  $D = 219 \text{ мм}$ ,  $s = 9 \text{ мм}$ , робочій температурі  $T = 275^\circ\text{C}$  і внутрішньому робочому тиску  $P = \text{до } 0,6 \text{ кгс/мм}^2$  [1]. Товщина стінки ділянки трубопроводу без ЕКЗ (6):

$$s_R = (P \cdot D) / (2|\sigma| + P) = (0,6 \cdot 219) / (2 \cdot 12,797 + 0,6) = 5,016416,$$

де  $|\sigma|$  – значення допустимого напруження для вуглецевих сталей ( $125,5 \text{ МПа} = 12,797 \text{ кгс/мм}^2$ ). Це табличне значення, що отримується з нормативного документа про загальні вимоги до норм і методів розрахунків на міцність [4].

Розраховуємо значення  $W$ ,  $A_R$ ,  $B_W$ ,  $B_S$  за формулами (7, 3, 4, 5):

$$\begin{aligned} W &= s_R^2(1 - \alpha^2(s_R)) / [4(2R_1 + a)(R_1 + a/2 + s_R/2)] = \\ &= (5,016416^2(1 - 0,9^2)) / [4(2 \cdot 100,5 + 6,1)(100,5 + (6,1/2) + (5,016416/2))] = 0,0000544, \end{aligned}$$

де  $R_1$  – внутрішній радіус,  $R_1 = (D - (2s)) / 2 = 100,5$ ;

$a$  – максимальна глибина ЕКЗ.

Згідно з нормами розрахунку допустимих товщин стінок трубопроводів з ЕКЗ [1], мінімально допустима товщина стінки в зоні локального зносу може складати 30% від номінальної товщини плюс 0,2 мм,  $s_{min} = 0,3s + 0,2 = 2,9 \text{ мм}$ . Таким чином, визначимо параметр максимальної глибини ЕКЗ  $a$ , розглядаючи мінімально допустиме значення товщини трубопроводу (нижню границю) відповідно до норм розрахунку допустимих товщин,  $s_{ниж} = s_{min}$ , а отже,  $a = s - s_{ниж} = 9 - 2,9 = 6,1 \text{ мм}$ .

$$A_R = 4/3 \cdot \left(0,5L / \sqrt{R_m s_R}\right)^2 = 4/3 \cdot \left((0,5 \cdot 19,985) / (\sqrt{105 \cdot 5,016416})\right)^2 = 0,253,$$

де  $L$  – довжина дефекту відповідно до (8),

$$L = L_{екв} = (2\sqrt{R \cdot s}) / \pi = (2\sqrt{(219/2) \cdot 9}) / 3,14159 = 19,985 \text{ мм};$$

$R_m$  – середній радіус.

Згідно з нормами розрахунку на міцність трубопроводів атомних енергетичних установок [1],  $D_m = 2R_1 + s = 2 \cdot 100,5 + 9 = 210 \text{ мм}$ , а отже,  $R_m = 0,5D_m = 105 \text{ мм}$ .

$$B_W = (\ln(R_2 / R_a) + W) / \ln(R_2 / R_1) = (\ln(109,5 / 106,6) + 0,0000544) / \ln(109,5 / 100,5) = 0,3136,$$

де  $R_2$  – зовнішній радіус,  $R_2 = 0,5D = 109,5 \text{ мм}$ ;

$$R_a = R_1 + a = 100,5 + 6,1 = 106,6 \text{ мм}.$$

$$\begin{aligned} B_S &= (R_1 / s)(\ln(R_2 / R_1) - \ln(R_2 / R_a) - W) = \\ &= (100,5 / 9)(\ln(109,5 / 100,5) - \ln(109,5 / 106,6) - 0,0000544) = 0,6574. \end{aligned}$$

Коефіцієнт зниження міцності труби з дефектом ерозійно-корозійного зносу (2):

$$\alpha(s_R) = (1 + A_R \cdot B_W \cdot B_S) / (1 + A_R \cdot B_S) = (1 + 0,253 \cdot 0,3136 \cdot 0,6574) / (1 + 0,253 \cdot 0,6574) \approx 0,902.$$

Значення 0,902 відповідає умові (1), отже, мінімально допустима товщина стінки (нижня границя) згідно з методикою [1] дорівнює  $s_{\text{ниж}} = 2,9 \text{ мм}$ , що не обов'язково, але також відповідає раніше зазначеній умові:  $s_{\text{ниж}} = \max\{s_{\text{min}}; 0,3s\}$ .

### 3. Оцінка залишкового ресурсу ймовірно-фізичним методом

Розрахунок залишкового ресурсу трубопроводу з дефектом ЕКЗ здійснюється з використанням ймовірно-фізичного підходу та розрахунків нижньої границі допустимої товщини стінки  $s_{\text{ниж}}$  відповідно до методики. Цей параметр ( $s_{\text{ниж}}$ ) розглядається як граничне значення  $\Pi_{\text{сп}}$  ресурсного визначального параметра  $\Pi$ , при досягненні якого об'єкт відмовить.

Процедура оцінки залишкового ресурсу: періодично заміряється визначальний параметр  $\varphi(t)$  із відомим граничним значенням  $\varphi(t) = \Pi_{\text{сп}}$ ; проводяться виміри граничного значення через певний період експлуатації  $\Delta t$ , під час якого обирається відповідний період  $\Delta\varphi(\Delta t)$  для забезпечення взаємо непов'язаних змін; значення цих вимірів представлено у формі послідовності значень ресурсного граничного параметра  $\varphi(t)$ , наприклад, для зростаючих періодів напрацювання:

$$\varphi(t_1); \varphi(t_2) = \varphi(t_1 + \Delta t); \varphi(t_n) = \varphi(t_{n-1} + \Delta t); \varphi(t_{n+1}) = \varphi(t_n + \Delta t),$$

де  $n$  – кількість отриманих показників вимірювань.

Так як дефект ЕКЗ незворотний, буде використано теоретичну модель надійності – дифузійний монотонний розподіл (DM-розподіл):

$$F(t) = DM(t; \mu; \nu) = \Phi\left(\frac{t - \mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right),$$

де  $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{U^2}{2}\right) dU$  – нормований нормальний розподіл;

$t$  – загальний час роботи (напрацювання);

$\mu$  – параметр масштабування (середній наробіток до відмови);

$\nu$  – коефіцієнт варіації для узагальненого деградаційного процесу.

Параметричне відображення DM-розподілу:

$$F(t) = DM(t; a; \nu) = \Phi\left(\frac{at + \Pi_1 - \Pi_0}{\nu\sqrt{at(\Pi_0 - \Pi_1)}}\right),$$

де  $\Pi_0$  – початковий показник визначального параметра;

$\Pi_1$  – максимальний вимірюваний показник визначального параметра;

$a$  – швидкість зміни визначального параметра.

Параметрами DM-розподілу є середня швидкість збільшення глибини дефекту ЕКЗ  $a$  і коефіцієнт варіації  $\nu = 0,35$  (середнє табличне значення) [3] процесу механіко-хімічного зносу.

Результати вимірювань використовуються для обчислення середньої швидкості зміни визначального параметра:

$$a = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n [\varphi(t_{i+1}) - \varphi(t_i)] = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta \varphi_i . \quad (9)$$

При монотонній зміні визначального параметра залишковий ресурс обчислюється таким чином:

$$\tilde{\pi}(\tau) = \frac{P_{cp} - P_1}{a} \left(1 + \frac{v^2}{2}\right), \quad (10)$$

де  $P_{cp}$  – граничний показник визначального параметра;

$\tau$  – напрацювання після  $t_1$ .

Розрахувавши параметр нижньої границі допустимої товщини стінки трубопроводу у місці його стоншення за методикою [1] (2,9 мм), отримуємо значення залишкового ресурсу при номінальному розмірі труби  $D = 219 \text{ мм}$ ,  $s = 9 \text{ мм}$ . Об'єкт експлуатувався 15 років, під час яких було проведено 2 інспекції щодо вимірювання глибини корозії з інтервалами в 5 років, результатами яких були показники, відповідно,  $i_1 = 1,24 \text{ мм}$ ,  $i_2 = 2,46 \text{ мм}$ ,  $i_3 = 3,69 \text{ мм}$ .

Середню швидкість зміни визначального параметра представимо у такому вигляді (9):

$$a = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n [\varphi(t_{i+1}) - \varphi(t_i)] = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta \varphi_i ,$$

де  $\Delta t$  – інтервал між інспекціями, 5 років;

$\Delta \varphi_i$  – різниця в розмірах ЕКЗ між інспекціями,  $\Delta \varphi_1 = 1,24 \text{ мм}$ ,  $\Delta \varphi_2 = i_2 - i_1 = 1,22 \text{ мм}$ ,  $\Delta \varphi_3 = i_3 - i_2 = 1,23 \text{ мм}$ ;

$$\tilde{\Delta \varphi} - \text{середня різниця в розмірах ЕКЗ, } \tilde{\Delta \varphi} = \frac{1,24 + 1,22 + 1,23}{3} = 1,23 \text{ мм} .$$

Середня швидкість росту дефекту ЕКЗ:

$$a = \frac{\tilde{\Delta \varphi}}{\Delta t} = \frac{(1,24 + 1,22 + 1,23) / 3}{5} = 0,246 \text{ мм / рік} .$$

Граничне значення визначального параметра товщини стінки трубопроводу, відповідно до розрахунків згідно з методикою [1],  $s_{\text{ниж}} = 2,9 \text{ мм}$ , отже, максимально допустима глибина корозійного зносу  $P_{cp} = s - s_{\text{ниж}} = 9 - 2,9 = 6,1 \text{ мм}$ ; максимальне значення глибини корозії під час інспекцій  $P_1 = 3,69 \text{ мм}$ ;  $\tau = 15 \text{ років}$ ; значення коефіцієнта варіації  $v = 0,35$ . Середнє значення залишкового ресурсу трубопроводу з дефектом ЕКЗ (10):

$$\tilde{\pi}(\tau) = \frac{P_{cp} - P_1}{a} \left(1 + \frac{v^2}{2}\right) = \frac{6,1 - 3,69}{0,246} \left(1 + \frac{0,35^2}{2}\right) \approx 10,4 \text{ років} .$$

Повний середній ресурс трубопроводу:  $\tau + \tilde{\pi}(\tau) = 15 + 10,4 \approx 25,4 \text{ років}$ .

#### 4. Висновки

Дослідження дозволяють оцінити рівень небезпеки виникнення ерозійно-корозійних пошкоджень, порівнюючи, чи відповідають розміри виявлених дефектів ЕКЗ встановленим критеріям, а основними перевагами методу є повне врахування геометричних характеристик трубопроводу, параметрів стоншення і напружено-деформованого стану дефектної труби.

Застосування методики для оцінки придатності до експлуатації дефектного трубопроводу дозволяє внести корективи у плани та строки проведення ремонтних робіт, а в окремих випадках зменшити вимоги до припустимої товщини стінок, яка піддається стоншенню внаслідок ЕКЗ. Остаточна оцінка технічного стану цілісності об'єкта з дефектами ЕКЗ – залишкового ресурсу проводиться з використанням вищезгаданого розрахункового параметра, який отримано за допомогою розглянутої методики, що в подальшому виступає як граничне значення визначального параметра дефекту в межах імовірно-фізичного підходу – на основі ймовірно-фізичної моделі надійності в вигляді дифузійного монотонного розподілу відмов (*DM*-розподілу).

#### СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Ворона Г.В., Ананченко М.С., Махненко О.В. Автоматизація процедури визначення допустимості ерозійно-корозійного зносу в трубопроводах АЕС із вуглецевих сталей. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2023. № 7 (1). С. 113–121.
2. Инюшев В.В., Бережной А.И., Завизион Э.А., Головкин В.Н., Петропавловский Е.И. Обзор методов технического освидетельствования трубопроводов ответственных потребителей группы «А» на АЭС. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2013. № 3. С. 10–15.
3. ДСТУ 8646:2016. Оцінювання і прогнозування залишкового ресурсу (терміну служби) технічних систем. Наказ від 2016-05-31 № 152 від 2017-07-01. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=93146](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=93146).
4. ISO 16528-1(2):2007. Boilers and pressure vessels. Performance requirements (Procedures for fulfilling the requirements of ISO 16528-1). 2007-08. ISO/TC. 18 (7) p.

*Стаття надійшла до редакції 09.02.2024*