

Автоматизація процедури визначення допустимості ерозійно-корозійного зносу в трубопроводах АЕС із вуглецевих сталей

Г.В. Ворона¹ • М.С. Ананченко² • О.В. Махненко²

Received: 10 January 2023 / Revised: 2 March 2023 / Accepted: 14 March 2023

Анотація. Багато трубопроводів на українських АЕС перебувають в експлуатації більше 30 років, і визначення допустимості дефектів ерозійно-корозійного зносу (ЕКЗ) металу стінки трубопроводу є на теперішній час однією з актуальних проблем атомної енергетики України. Проведено порівняльний аналіз визначення допустимості стоншення стінки трубопроводу внаслідок ЕКЗ за прийнятою в дію ДП НАЕК “Енергоатом” методикою “МТ-Т.0.03.224-18” та керівництвом, заснованому на використанні нормативних документів на проектування елементів трубопроводів. Використання методики продемонструвало значні переваги з точки зору зниження консервативності оцінки ЕКЗ, особливо для стоншень невеликих розмірів, а також для трубопроводів під тиском нижче 60–80 кгс/см², що дозволяє значно скоротити об’єми ремонтних робіт. Але впровадження методики на практиці може бути пов’язане з проблемами через складність та трудомісткість процедури розрахункової оцінки для персоналу АЕС. Тому для автоматизації виконання оцінки допустимості ЕКЗ в трубопроводі згідно вимог методики було розроблено програмне забезпечення (ПЗ) для використання персоналом АЕС, яке дозволяє оперативне отримувати протокол процедури експрес оцінки допустимості ЕКЗ прямолінійної ділянки трубопроводу на основі результатів вимірювання параметрів стоншення стінки в осьовому напрямку, а саме зробити висновок: чи ділянка може бути допущена до експлуатації, має бути відправлена на ремонт або необхідне проведення уточненої оцінки. Також розроблено ПЗ на основі методу скінченних елементів (МСЕ), що при необхідності дозволяє проводити уточнену оцінку для прямолінійної ділянки, враховуючи глибину і кут стоншення в окружному напрямку, і розраховувати напруження граничного пластичного стану ділянки трубопроводу з ЕКЗ з точки зору в’язкого руйнування. Область застосування розробки – атомна енергетика України.

Ключові слова: АЕС, трубопровід, ерозійно-корозійний знос, дефект стоншення стінки, в’язке руйнування, напруження граничного стану, програмне забезпечення, метод скінченних елементів.

Вступ

Багато трубопроводів на АЕС України перебувають в експлуатації більше 30 років, працюючи в умовах напруженого стану, підвищеної температури, корозійного середовища і інших негативних факторів, які сприяють виникненню ерозійно-корозійного зносу (ЕКЗ) металу стінки трубопроводу [10, 11]. Визначення допустимості ЕКЗ з урахуванням розмірів зони стоншення стінки, особливостей експлуатації і конфі-

гурації трубопровідної системи є на теперішній час однією з актуальних проблем атомної енергетики України [1, 2]. Згідно даних ультразвукового контролю товщини стінки ділянка трубопроводу з ЕКЗ може бути допущена для подальшої експлуатації, або відправлена на виконання ремонту. Для визначення допустимості ЕКЗ необхідна оцінка залишкової міцності ділянки трубопроводу зі стоншенням стінки. До останнього часу процедура визначення допустимості ЕКЗ на АЕС України виконувалась згідно керівництва [3], яке базувалось на вимогах нормативних документів і ОСТів на проектування елементів трубопроводів АЕС [4–6]. Тобто, мінімально допустимі товщини стінки ділянки трубопроводу з ЕКЗ визначались за результатами розрахункового вибору основних розмірів бездефектних елементів трубопроводів під дією внутрішнього тиску і температури.

✉ Г. Ворона
grisha.vorona@gmail.com

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

² ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, Україна

В 2018 році в ДП НАЕК «Енергоатом» введено в дію методика «МТ-Т.0.03.224-18» [7] (далі – Методика) оцінки в'язкого руйнування ділянки трубопроводу з ЕКЗ. Методика регламентує порядок оцінки ступеню небезпеки ЕКЗ шляхом зіставлення вимірюваного значення ЕКЗ з критеріальними значеннями (експрес оцінка) і, у випадку необхідності, додаткового (уточненого) розрахунку мінімальної товщини стінки таких елементів трубопроводу як прямолінійні ділянки, згини, трійники, конусні перехідники і прямолінійні ділянки після дроселюючих та вимірювальних діафрагм. Таким чином, методика включає два послідовних підходи визначення граничного пластичного стану трубопроводу: на основі параметрів стоншення стінки в поздовжньому та поперечному напрямках [1, 8]. Спочатку проводиться експрес оцінка допустимості ЕКЗ, враховуючи довжину та глибину стоншення, що дозволяє зробити висновок: чи ділянка може бути допущена для подальшої експлуатації, має бути відправлена на ремонт або необхідне проведення уточненої оцінки. Експрес оцінка допустимості ЕКЗ згідно вимог Методики проводиться силами персоналу АЕС. У разі необхідності проводиться уточнена оцінка, яка враховує глибину і кут в окружному напрямку стоншення, та визначає референсні напруження граничного пластичного стану трубопроводу з урахуванням навантаженості ділянки трубопроводу. Розраховані напруження порівнюються з допустимими для матеріалу трубопроводу, на основі чого робиться остаточний висновок чи допустима ділянка з ЕКЗ до подальшої експлуатації або необхідно проводити ремонт. Виконання уточнених розрахунків згідно вимог Методики проводиться із залученням спеціалізованих організацій.

Результати аналізу, які представлені в даній роботі демонструють, що використання Методики дозволяє у багатьох випадках трубопроводів з ЕКЗ суттєво зменшити вимоги до допустимої товщини стінки і, відповідно, значно знизити об'єми ремонтних робіт. Але впровадження методики «МТ-Т.0.03.224-18» на практиці може бути пов'язане з проблемами через складність та трудомісткість процедури розрахункової оцінки для персоналу АЕС. Доцільним є автоматизація процедури оцінки ЕКЗ на основі розробки програмного забезпечення (ПЗ) для визначення допустимості ділянок трубопроводу з дефектами стоншення.

1. Переваги методики «МТ-Т.0.03.224-18»

Проведено порівняльний аналіз оцінки мінімально допустимої товщини стінки трубопроводу, підтвердженого ЕКЗ, згідно керівництва з використанням ОСТів на проектування та розрахункової експрес оцінки за Методикою і додаткових уточнених розрахунків.

1.1. Експрес оцінка

Згідно Методики експрес оцінка ЕКЗ проводиться відповідно до підходу визначення граничного

пластичного стану трубопроводу, враховуючи глибину a та довжину L стоншення стінки (Рис. 1). Виконання експрес оцінки ЕКЗ зводиться к співставленню встановленої в результаті контролю найменшої товщини стінки трубопроводу s_{min} з критеріальними значеннями мінімально допустимих товщин $s_{ниж}$ (нижня границя) і $s_{верх}$ (верхня границя). Згідно з положення концепції Методики приймається збільшення на 10% напружень, які відповідають допустимому стану. Це положення узгоджується із сучасними закордонними нормативними документами визначення мінімально допустимих стінок трубопроводів [9].

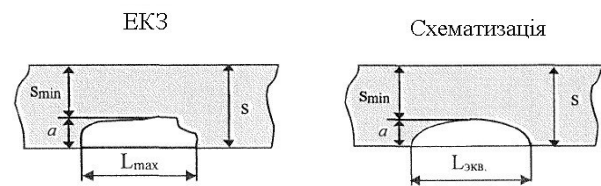


Рис. 1. Схема ЕКЗ

Таким чином, значення нижньої границі мінімально допустимої товщини $s_{ниж}$ стінки прямолінійного елемента трубопроводу визначається умовою

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

де $\alpha(s_R)$ – безрозмірний коефіцієнт зниження міцності труби з ЕКЗ:

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

$$\text{де } A_R = \frac{4}{3} \left(\frac{0,5L}{\sqrt{R_m s_R}} \right)^2, \quad B_W = \frac{\ln(R_2/R_a) + W}{\ln(R_2/R_1)},$$

$$B_S = \frac{R_1}{s} (\ln(R_2/R_1) - \ln(R_2/R_a) - W),$$

L_{max} – максимальна довжина ЕКЗ в поздовжньому напрямку, R_m – середній радіус елемента, $s_R = \frac{P \cdot D}{2|\sigma| + P}$ –

розрахункова товщина стінки прямолінійної ділянки трубопроводу без ЕКЗ [6], P – внутрішній тиск, D – зовнішній діаметр, $|\sigma|$ – допустимі напруження, R_1 – внутрішній радіус, R_2 – зовнішній радіус, $R_a = R_1 + a$, a – максимальна глибина ЕКЗ, $W = s_R^2 (1 - \alpha^2(s_R)) / [4(2R_1 + a)(R_1 + a/2 + s_R/2)]$.

Під довжиною дефекту стоншення в Методіці приймається так звана еквівалентна довжина $L_{екв}$ в осьовому напрямку елемента трубопроводу, яка визначається через значення найбільшої протяжності ЕКЗ L_{max}

$$L_{екв} = \frac{2}{\pi} L_{max}. \quad (3)$$

Значення верхньої границі мінімально допустимих

мої товщини $s_{\text{верх}}$ стінки прямолінійного елемента трубопроводу визначається умовою:

$$\alpha(s) = 0,9 \cdot \frac{|\bar{\sigma}|}{|\bar{\sigma}|_{\text{факт}}}, \quad (4)$$

де $|\bar{\sigma}|$ – допустимі напруження при оцінці конструкційної міцності перерізу з ЕКЗ, які визначаються за мінімально гарантованими механічними характеристиками матеріалу труби [ПНАЕ Г-7-002-86], $|\bar{\sigma}|_{\text{факт}}$ – допустимі напруження, які визначаються за фактичними (паспортними) значеннями механічних характеристик матеріалу. Безрозмірний коефіцієнт $\alpha(s)$ зниження міцності труби з ЕКЗ визначається виразом (1) при умові $s_R = s$, де s – номінальна (фактична) товщина стінки прямолінійної ділянки трубопроводу. Відповідні вирази регламентуються в Методиці для криволінійних елементів (колін), конусних переходів, трійникових елементів.

Нижче представлено порівняння допустимих товщин згідно керівництва, яке базувалося на вимогах нормативних документів на проектування елементів трубопроводів АЕС, та за результатами експрес оцінки, згідно якої значення мінімальної товщини має верхню і нижню границі. Якщо товщина стінки трубопроводу в зон стоншення стінки вище верхньої границі, то такий дефект стоншення гарантовано допустимий для подальшої експлуатації; якщо товщина менше нижньої границі, то дефект недопустимий; якщо величина товщини стінки знаходиться між значеннями нижньої і верхньої границь, тоді необхідне проведення уточненої оцінки. Оскільки при проведенні експрес оцінки граничний стан трубопроводу зі стоншенням стінки розглядається в залежності від розміру ЕКЗ в осьовому напрямку, то нижня і верхня границі залежать від довжини стоншення: чим більша довжина зони стоншення, тим меншою є його допустима глибина a , і відповідно тим більшою має бути допустима товщина.

При оцінці допустимості ЕКЗ зручно використовувати “одичну” довжину дефекту, яка визначається

як $L1 = \sqrt{R \times s}$, де R – радіус трубопроводу, а s – товщина стінки.

На рис. 2 (а, б) зображено порівняння залежності мінімально допустимої товщини стінки трубопроводу у місці стоншення згідно керівництва з використанням ОСТів на проектування і за Методикою (верхня, нижня границі) в залежності від довжини зони стоншення на прикладі трубопроводів 630×17 мм та 219×9 мм (матеріал Сталь 20). Нижче суцільної лінії ($s_{\text{ниж}}$) товщина стінки є недопустимою, вище штрихової ($s_{\text{верх}}$) – гарантовано допустимою. Заштрихована зона позначає значення товщин з ЕКЗ, при яких необхідне проведення уточненої оцінки.

На рис. 3 (а, б) графічно зображено порівняння номінальної товщини s стінки трубопроводів 630×17 мм та 219×9 мм при проектуванні, з мінімально допустимою товщиною стінки з урахуванням дефекта ЕКЗ за керівництвом з використанням ОСТів на проектування та нижньою і верхньою границями мінімально допустимої товщини стінки згідно Методики при “одичній” довжині дефекту. Для трубопроводу 630×17 мм “одична” довжина $L1=73$ мм, для трубопроводу 219×9 мм - $L1=31$ мм.

Більш детальні дані з порівняння мінімально допустимих товщин згідно керівництва з використанням ОСТів і Методики для “одичної” довжини дефекту трубопроводів у діапазоні діаметрів 219–820 мм представлено у таблиці 1.

З даних на рис. 2 і рис. 3 можна зробити висновки, що оскільки майже завжди при “одичній” довжині дефекту верхня границя товщини стінки по методиці $s_{\text{верх}}$ менша за допустиму товщину стінки згідно керівництва з використанням ОСТів на проектування ($s_{\text{ост}}$), то у більшості випадків методика дає гарантовану перевагу при визначенні мінімально допустимої товщини стінки (близько 20–25%) для дефектів невеликої довжини (близької до “одичної”) у осьовому напрямку. Також можна зробити висновок, що проведення уточненої оцінки по нижній границі ($s_{\text{ниж}}$) за

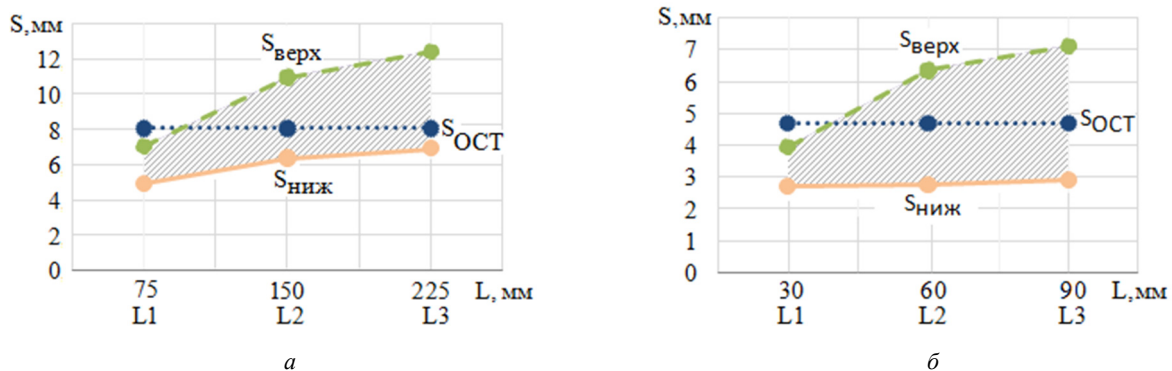


Рис. 2. Порівняння допустимої товщини стінки у місці стоншення за керівництвом з використанням ОСТів на проектування ($s_{\text{ост}}$) і Методикою (верхня $s_{\text{верх}}$ і нижня $s_{\text{ниж}}$ границі) для трубопроводів: а) 630×17 мм (Сталь 20, $P = 40$ кгс/см², $T = 200^\circ\text{C}$) і б) 219×9 мм (Сталь 20, $P = 60$ кгс/см², $T = 275^\circ\text{C}$)

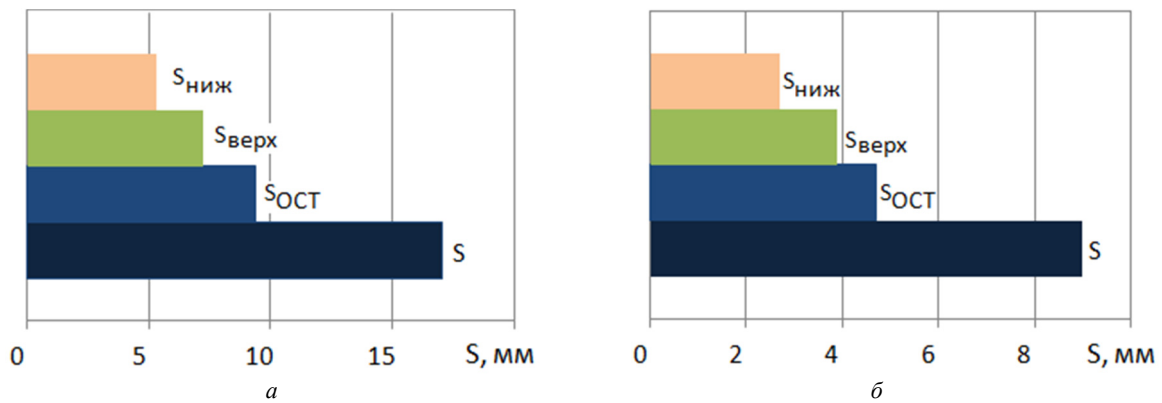


Рис. 3. Порівняння номінальної товщини стінки з допустимою товщиною у місці стоншення за керівництвом з використанням ОСТів на проектування ($s_{ост}$) і Методикою (верхня $s_{верх}$ і нижня $s_{ниж}$ границі) для трубопроводів: а) 630×17 мм (Сталь 20, $P = 40$ кгс/см², $T = 200^\circ\text{C}$) і б) 219×9 мм (Сталь 20, $P = 60$ кгс/см², $T = 275^\circ\text{C}$)

Таблиця 1. Порівняння допустимої товщини стінки прямолінійної ділянки трубопроводу (матеріал Сталь 20) у місці стоншення за керівництвом з використанням ОСТів на проектування і Методикою (верхня і нижня границі) для стоншення одиничної довжини $Ll = \sqrt{R \times s}$

Номінальний розмір		Робочий тиск P , кгс/см ²	Робоча температура T , °C	за ОСТ $s_{ост}$, мм	за Методикою	
D , мм	s , мм				Верхня границя $s_{верх}$, мм	Нижня границя $s_{ниж}$, мм
219	9	До 60	275	4,7	3,9	2,9
325	8	До 25	350	4,4	3,4	2,4
	10	До 22	350	5,5	4,3	2,3
	13	До 60	275	7,7	5,5	4,2
	19	До 120	250	12,1	8,0	7,0
377	9	До 25	350	5,0	3,9	2,7
	10	До 22	350	5,5	4,3	2,5
	13	До 40	200	6,8	5,5	3,5
До 60		275	7,7	5,5	4,6	
426	9	До 25	350	5,0	3,8	2,9
	14	До 40	200	7,7	5,9	3,9
	24	До 120	250	15,7	10,1	9,0
530	8	До 25	350	4,4	3,4	3,1
	10	До 22	350	5,5	4,2	3,2
	12	До 22	350	6,6	5,1	3,4
	28	До 120	250	16,2	11,7	10,7
630	8	До 25	350	4,4	3,4	3,3
	12	До 22	350	6,6	5,1	3,7
	17	До 40	200	9,4	7,1	5,3
	25	До 80	300	17,5	10,4	9,5
820	9	До 25	350	5,0	3,8	3,8

методикою може значно знизити (у деяких випадках до 50%) вимоги для мінімально допустимої товщини стінки. З даних в таблиці 1 видно, що чим нижче робочий тиск в трубопроводі, тим суттєвіше зменшуються вимоги до допустимої товщини стінки по нижній границі ($s_{ниж}$) у порівнянні з експрес оцінкою, яка визначає допустимість ЕКЗ по верхній границі ($s_{верх}$).

1.2. Уточнена оцінка

Уточнена оцінка проводиться коли товщина стінки трубопроводу з ЕКЗ більша за нижню границю допустимої товщини стінки, але менша за верхню границю. На рис. 2 діапазон значень товщин, при яких проводиться уточнена оцінки з врахуванням глибини і

кута стоншення в окружному напрямку, позначений штрихованою областю.

Для оцінки ослаблення елемента трубопроводу в осьовому напрямку від наявності стоншення стінки з характерним розміром в поперечному (окружному) напрямку елемента трубопроводу необхідно визначити розрахункові референсні напруження.

З даних у таблиці 1 видно, що проведення уточненої оцінки особливо має сенс для трубопроводів під низьким робочим тиском, для яких значення нижньої границі значно менше за значення верхньої границі гарантовано допустимої товщини стінки зі стоншенням стінки. Значення нижньої границі залежить від тиску трубопроводу, тобто. для трубопроводу під високим тиском різниця між верхнюю і нижньою границею допустимої товщини стінки зовсім незначна. Отже для трубопроводів під низьким робочим тиском проведення уточненої оцінки може аргументувати суттєве зменшення вимог для допустимої товщини стінки у порівнянні з експрес оцінкою.

Для проведення уточненої оцінки допустимості трубопроводу з ЕКЗ Методика регламентує алгоритм визначення референсних напружень, який оснований на моделі критичного пластичного стану і який враховує одночасну дію всіх трьох силових факторів:

$$P = p \cdot \sigma_{ref} \cdot s / R_m - \text{внутрішній тиск};$$

$$N = n \cdot 2\pi \cdot R_m \cdot s \cdot \sigma_{ref} - \text{осьова сила};$$

$$M = m \cdot 4 \cdot R_m^2 \cdot s \cdot \sigma_{ref} - \text{згинальний момент},$$

де p , n , m – безрозмірний внутрішній тиск, осьова сила та згинальний момент відповідно, σ_{ref} – розрахункове референсне напруження при наявності ЕКЗ. Розрахунок граничного тиску відповідає класичним схемам розподілів напружень (типу $(M/[M]) + (N/[N])^2 = 1$). Дані процедури застосовні для оцінки послаблення в осьовому напрямку від поперечного ЕКЗ в прямих трубах, згинах та конічних переходах.

Проведення уточненої оцінки розглянуто нижче на прикладі трубопроводів 630×17 мм та 377×16 мм, враховуючи параметри ЕКЗ, а саме, товщину стінки у

місці стоншення $s_{ЕКЗ}$ і кут 2ψ стоншення в окружному напрямку; загальний НДС трубопроводу і локальний НДС ділянки зі стоншенням. Товщина стінки зі стоншенням навмисно вибиралася наближеною до значення нижньої границі $s_{ниж}$, визначеної в результаті проведення експрес оцінки, щоб оцінити допустимість товщини аж до її мінімально допустимого значення.

В таблиці 2 приведені геометричні і експлуатаційні параметри трубопроводу 377×16 мм, порівняння значень допустимих товщин стінки за ОСТ і Методикою, а також параметри ЕКЗ. В таблиці 3 продемонстровано приклад результатів розрахунку референсних напружень граничного стану трубопроводу у місці стоншення стінки для представлених в таблиці 2 параметрів ЕКЗ на ділянці з рівнем еквівалентних напружень 85 МПа. Видно, що навіть при значенні товщини стінки s_{min} , наближеної до мінімально допустимої границі $s_{ниж}$, та при високому рівні навантаженості ділянки з ЕКЗ, референсні напруження не перевищують допустимих, а отже стоншення являється допустимим.

Аналогічний приклад даних для трубопроводу 630×17 мм стосовно геометричних і експлуатаційних параметрів, а також параметрів ЕКЗ і розрахованих референсних напружень приведені в таблиці 4 і в таблиці 5.

Проаналізувавши дані з таблиць 3 і 5, а також результати розрахунку референсних напружень для інших трубопроводів можна зробити висновок, що коли еквівалентні напруження у перерізі трубопроводу без урахування стоншення досягають 70–80 МПа, то референсні напруження у поперечному перерізі зі стоншенням мають величину близько 120–140 МПа. Допустимі напруження для поширеної на трубопроводах АЕС сталі 20 за температурних режимів 250–300°C мають величину близько 130–140 МПа. Отже можна зробити висновок, що на ділянках трубопроводів, які слабо навантажені (умовно з рівнем еквівалентних напружень до 70–80 МПа), уточнена оцінка дозволяє аргументувати продовження експлуатації ділянок з ЕКЗ з мінімальною товщиною стінки близької до значення нижньої границі ($s_{ниж}$).

Таблиця 2. Геометричні та експлуатаційні параметри трубопроводу 377×16 мм (Сталь 20)

Номинальний розмір, мм		Робочий тиск, кгс/см ²	за ОСТ $s_{ост}$, мм	за Методикою, мм		Параметри ЕКЗ	
D	s			Сверх, мм	$s_{ниж}$, мм	s_{min} , мм	2ψ , °
377	16	60	8,1	6,8	4,9	5,0	90

Таблиця 3. Розрахунок референсних напружень у поперечному перерізі зі стоншенням та аналіз допустимості ЕКЗ на прикладі трубопроводу 377×16 мм

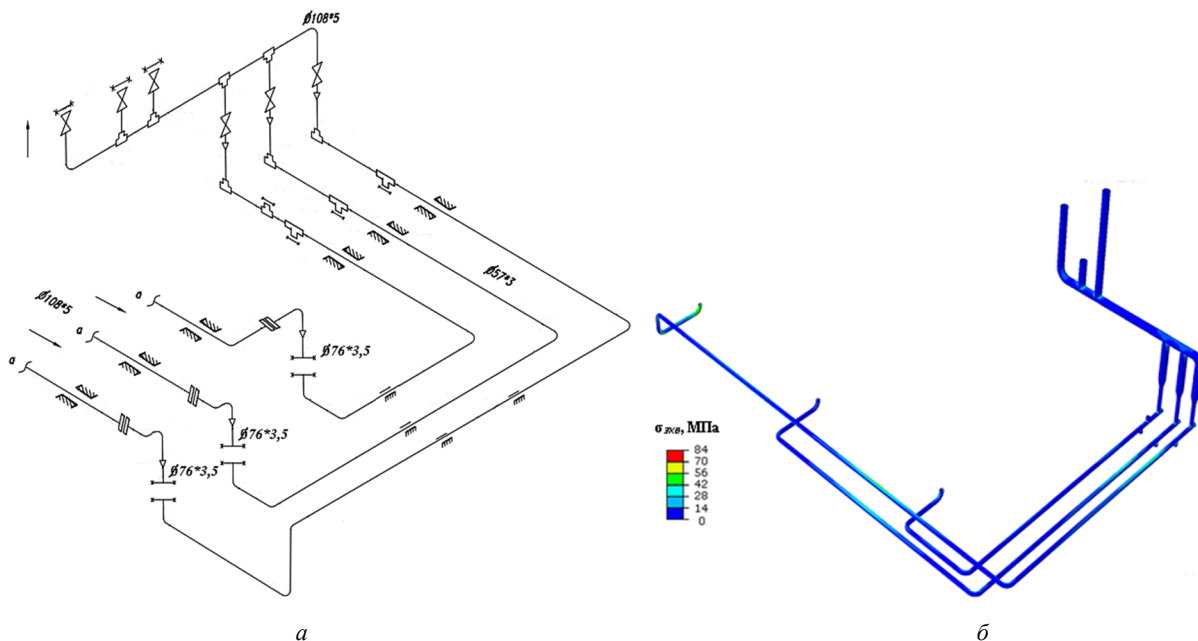
Еквівалентні напруження $\sigma_{екв}$, МПа	Референсні напруження σ_{ref} , МПа	Допустимі напруження $[\sigma]$, МПа	Осьове зусилля N_x , кН	Згинальний момент M_y , кН·м	Згинальний момент M_z , кН·м
85	134	< 143	150	130	40

Таблиця 4. Геометричні та експлуатаційні параметри трубопроводу 630×17 мм (Сталь 20)

Номинальний розмір, мм		Робочий тиск, кгс/см ²	s за ОСТ, мм	s за Методикою, мм		Параметри ЕКЗ	
D	s			Сверх, мм	Сниж, мм	s _{min} , мм	2ψ, °
630	17	40	9,4	7,1	5,3	5,5	90

Таблиця 5. Розрахунок референсних напружень у поперечному перерізі з дефектом та аналіз допустимості ЕКЗ на прикладі трубопроводу 630×17 мм

Еквівалентні напруження $\sigma_{\text{экв}}$, МПа	Референсні напруження σ_{ref} , МПа	Допустимі напруження $[\sigma]$, МПа	Осьове зусилля N_x , кН	Згинальний момент M_y , кН·м	Згинальний момент M_z , кН·м
72	136	< 143	100	300	150

Рис. 4. Приклад трубопроводу хімічного цеху енергоблоку ВВЕР-1000: а) схема трубопроводу; б) розрахунковий розподіл еквівалентних напружень при експлуатаційному навантаженні ($P=13$ кгс/см², $T=55^\circ\text{C}$)

Слід зазначити, що з досвіду розрахунків трубопроводних систем АЕС ділянок з рівнем навантаженості вище 70–80 МПа є достатньо незначна кількість, тоді як більша частина трубопроводів другого контуру і технологічних має рівень напружень до 40–50 МПа. Як показано на рис. 4 на прикладі типового трубопроводу хімічного цеху енергоблоку ВВЕР-1000, значна частина якого має стан за інтенсивністю напружень нижче 14 МПа, що пов'язано з невисоким внутрішнім тиском ($P=13$ кгс/см²). На решті ділянок трубопроводу виникають напруження до 40...50 МПа, що, в свою чергу, пов'язано з розташуванням опор закріплення та додаткових мас у вигляді арматури. І тільки в локальному місці трубопроводу на згині інтенсивність напруження досягає максимального значення до 85 МПа. Таким чином можна узагальнити, що на більшості ділянок типових трубопроводів уточнена оцінка згідно Методики може обґрунтувати допустимість ділянок з ЕКЗ з мі-

німальною товщиною стінки за значенням нижньої границі ($s_{\text{ниж}}$).

2. Розробка програмного забезпечення для визначення допустимості ЕКЗ

Реалізація методики “МТ-Т.0.03.224-18” на практиці зустрічається з проблемами при впровадженні, по-перше, через складність процедури розрахунку для персоналу АЕС навіть експрес оцінки ЕКЗ, по-друге, через трудомісткість оцінки, так як для кожного ЕКЗ в окремому трубопроводі необхідно проведення нового розрахункового аналізу. З метою автоматизації аналізу ЕКЗ розроблене програмне забезпечення (ПЗ) для визначення допустимості стоншення стінки прямолінійної ділянки трубопроводу на основі проведення розрахункових процедур експрес оцінки та уточненої оцінки.

В програмному середовищі для роботи з електронними таблицями Excel розроблена програма для автоматизації проведення процедури експрес оцінки допустимості ЕКЗ згідно методики “МТ-Т.0.03.224-18”. Геометричні і експлуатаційні параметри трубопроводу, та параметри ЕКЗ в повздовжньому напрямку вводяться як вхідні дані. Програма автоматично проводить розрахунок допустимості стоншення і виводить висновок: чи стоншення допустиме, недопустиме або необхідне проведення уточненої оцінки (рис. 5). Також програма автоматично формує детальний протокол (рис. 6) процедури розрахункової експрес оцінки допустимості ЕКЗ, що дуже важливо для ефективного використання методики персоналом АЕС.

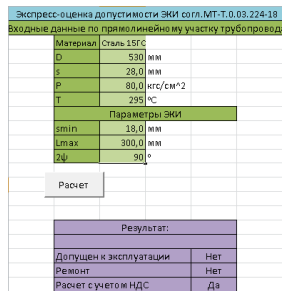


Рис. 5. Вікно програми проведення експрес оцінки допустимості ЕКЗ прямолінійної ділянки трубопроводу

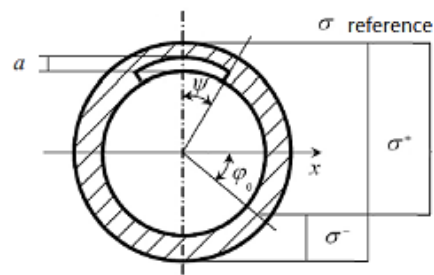
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	УСТАНОВЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ ЭРОЗИОННО-КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ МТ-Т.0.03.224-18								
2	Прямолинейный участок трубопровода № ... 630 x 25 мм								
3	Dнар =	630	мм						
4	s =	25	мм						
5	материал	Сталь 20							
6	R =	11,78	кгс/см²						
7	T =	300	°C						
8	smin =	18,1	мм						
9	2φ =	90	°						
10	Lmax =	100	мм						
11	[σ]факт =	118,0	МПа						
12	1. Установление расчетной толщины стенки трубопровода, и эквивалентной длины ЭКИ в осевом направлении элемента трубопровода Lэкв согласно Приложению Е:								
13	sr = RxDнар/(2*φ*σ+R) =	3,07	мм						
14	Lэкв = (2/n)*Lmax =	63,7	мм						
15	2. Определение критерийного значения s1 итерационным методом, согласно Приложению А.1.								
16	Для приведенных выше геометрических параметров, материала и условий эксплуатации трубопровода, а также параметров ЭКИ, с учетом п.1, принимается значение:								
17	s1 =	2,30	мм						
18	3. Определение величины:								
19	max { s1 ; 0,3*s } =	max { 2,30 ; 7,50 }	=	7,50	мм				
20	4. Определение критерийного значения s2 итерационным методом, согласно Приложению А.2.								
21	Для приведенных выше геометрических параметров и условий эксплуатации трубопровода, а также параметров ЭКИ, с учетом п.1 и фактических характеристик материала принимается значение:								
22	s2 =	4,92	мм						
23	5. Таким образом smin > s2								
24	6. Площадь поперечного сечения трубопровода без ЭКИ:								
25	Sбезэф = π*((0,5xDнар)² - (0,5xDнар - s)²) =	47516,59	мм²						
26	7. Площадь поперечного сечения трубопровода с учетом наибольшего ЭКИ:								
27	Sэф = Sбезэф - Sки =	4436,03	мм²						
28	Sки = 2*sr*(0,5xDнар - s + 0,5*(s - smin)) * (s - smin) =	3180,56	мм²						
29	где φ - половина угла, на который опирается ЭКИ в окружном направлении, (0,5xDнар - s) - внутренний радиус элемента трубопровода, (s - smin) - максимальная глубина ЭКИ.								
30	8. Соотношение площадей:								
31	(Sэф/Sбезэф) =	0,933	>	0,9					
32	9. Окончательно имеем:								
33	9.1. smin > s2								
34	9.2. (Sэф/Sбезэф) = 0,933 > 0,9								
35	Согласно п.3.3 данный трубопровод должен быть: допущен к эксплуатации								

Рис. 6. Протокол проведения експрес оцінки допустимості ЕКЗ прямолінійної ділянки трубопроводу, який автоматично формує програма

Для проведення уточненої оцінки було розроблено ПЗ на основі методу скінченних елементів (МСЕ), яке дозволяє розраховувати референсні напруження на ділянці трубопроводу зі стоншенням (рис. 7а). Референсні напруження характеризують граничний стан трубопроводу, коли напруження у кожній точці поперечного перерізу зі стоншенням досягають граничного пластичного значення, і їх перевищення призводить до в'язкого руйнування. Вони визначаються в залежності від параметрів стоншення (глибини та кута в окружному напрямку) та зусиль (осьової сили та моменту) у поперечному перерізі трубопроводу (рис. 7б) [7, 8].



a



б

Рис. 7. Ерозійно-корозійний знос на ділянці трубопроводу (а) та схема поперечного перерізу зі стоншенням для визначення референсних напружень (б) [8] (φ₀ – кут зони переходу напружень розтягу в стискаючі)

Для проведення розрахункового аналізу НДС трубопроводної системи використано скінчено-елементну модель, яка об'єднує балочну та оболонкову моделі, в пружній або пружно-пластичній постановці з урахуванням внутрішнього тиску, власної ваги, температури та розташування опор конструкції. В скінчених елементах моделі, що відповідають зоні виявленого ЕКЗ на реальному трубопроводі (рис. 8а), задаються параметри стоншення: глибина *a* і кут *ψ*. Визначені при розрахунку НДС внутрішні зусилля використовуються для визначення референсних напружень в зоні стоншення (рис. 8б). Для порівняння на (рис. 8в) продемонстровані відповідні еквівалентні напруження у тих же перерізах трубопроводу, але без урахування ЕКЗ.

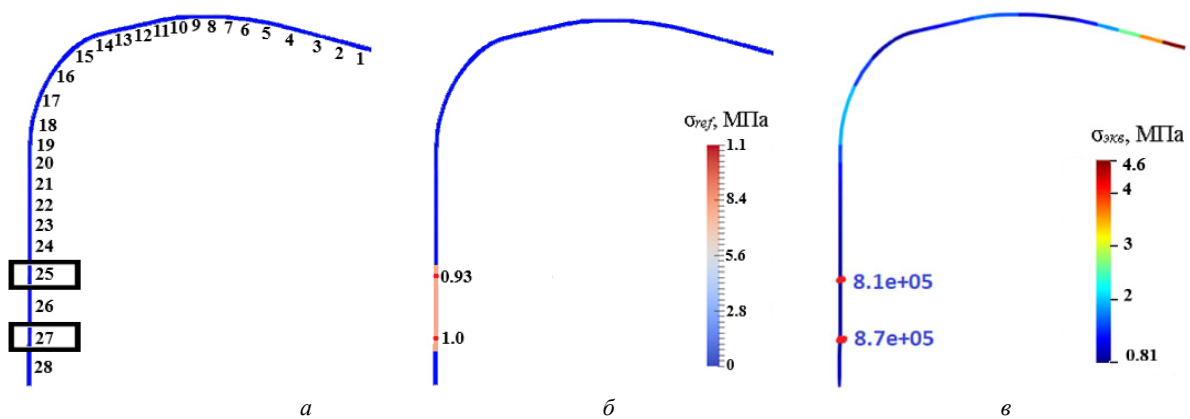


Рис. 8. Приклад розрахунку напруженого стану на ділянці трубопроводу: а) скінченні елементи, в яких задавалися параметри стоншення стінки; б) референсні напруження; в) еквівалентні напруження без врахування ЕКЗ

Для оцінки залишкової міцності трубопроводу розрахункові референсні напруження порівнюються з допустимими напруженнями, які визначаються для матеріалу з необхідним рівнем запасу міцності для відповідної категорії напружень. З проведеної оцінки робиться висновок, чи допустима ділянка трубопроводу з ЕКЗ для подальшої експлуатації або необхідно проводити її ремонт.

Висновки

1. Порівняльний аналіз результатів визначення допустимої товщини стінки трубопроводу з ЕКЗ за методикою “МТ-Т.0.03.224-18” та керівництва з використанням нормативних документів ОСТів на проектування, показав що:

а) При невеликих розмірах стоншення стінки в осьовому напрямку трубопроводу проведення експрес оцінки за Методикою дозволяє суттєво знизити вимоги до допустимої товщини стінки трубопроводу.

б) Для трубопроводів під низьким тиском (умовно до 60–80 кгс/см²) нижня границя допустимої товщини стінки в зоні ЕКЗ, визначена за експрес оцінкою, значно нижча за верхню границю, а також нижча значення допустимої товщини стінки згідно керівництва,

отже проведення уточненої оцінки за Методикою є доцільним.

в) Оскільки більшість ділянок трубопроводів не є високонавантаженими (рівень еквівалентних напружень умовно нижче 70–80 МПа), то проведення уточненої оцінки за Методикою обґрунтовує допустимість товщини стінки зі стоншенням за значенням нижньої границі, визначеною за експрес оцінкою.

г) Використання Методики при визначенні допустимості експлуатації ділянки трубопроводу з ЕКЗ дозволяє значно скоротити об’єми ремонтних робіт.

2. Для автоматизації проведення аналізу допустимості ЕКЗ в стінці прямолінійної ділянки трубопроводу за експрес оцінкою згідно методики “МТ-Т.0.03.224-18” розроблена програма в середовищі для роботи з електронними таблицями Excel, а для виконання уточненої оцінки розроблено програмне забезпечення на основі методу скінченних елементів, які дозволяють оперативне задавати параметри стоншення стінки, розраховувати значення верхньої і нижньої границь допустимої товщини стінки в зоні ЕКЗ, при необхідності референсні напруження та визначити допустимість ділянки трубопроводу з ЕКЗ.

References

- [1] S. Ageiev, “Methodology for Assessing the Allowable Wall Thicknesses of Carbon Steel NPP Piping under Erosion-Corrosion Wear”, *J. Nuclear and Radiation Safety*, No. 3(91), pp. 32–42, 2021. DOI: 10.32918/nrs.2021.3(91).04
- [2] I.V. Biblik, K.V. Avramov and R.A. Rusanov, “Prediction of flow accelerated corrosion of NPP pipeline elements by network simulation method”, *J. of Mech. Eng.*, Vol. 21, No. 3, pp. 13–19, 2018. DOI: 10.15407/pmach2018.03.013
- [3] IN-T.0.03.190-14. Unified instructions for measuring wall thickness of pipeline elements subject to erosion-corrosion wear using ultrasound.
- [4] OST 24.125.33-89 Bent branches for pipelines in NPP, 1991. DOI: 10.3817/0991089085
- [5] OST 24.125.04-89 Bent branches pipelines in NPP, 1991. DOI: 10.3817/0991089085
- [6] PNAE G-7-002-86. (1989). Standards for strength calculation of NPP equipment and piping. Moscow, Energoatomizdat, 524.
- [7] Methodology of definition allowable thicknesses of the elements of pipelines in NPP from carbonaceous steels subjected to effect of erosion-corrosion wear МТ-Т.0.03.224-18, NNEGC of Ukraine Energoatom, 2019.

- [8] I. Orynyak, S. Ageiev and S. Radchenko, “Local and global reference stresses for circumferential irregular-shaped defects in pipes”, *J. Pressure Vessel Technologies*, vol. 137(4), 2015. DOI: 10.1115/1.4028680
- [9] RD EO 0571-2006. (2006). Standards of allowable wall thicknesses for NPP pipeline elements made of carbon steel. Moscow, JSC Rosenergoatom, 44.
- [10] Elodie Gipon, Stéphane Trevin, Flow-accelerated corrosion in nuclear power plants, Woodhead Publishing, 2020, Pages 213-250, ISBN 9780128237199. DOI: 10.1016/B978-0-12-823719-9.00006-8
- [11] Poulson Bryan. Predicting and Preventing Flow Accelerated Corrosion in Nuclear Power Plant. International Journal of Nuclear Energy, 2014, pp. 1–23. DOI: 10.1155/2014/423295

Automation of the procedure for determining the admissibility of erosion-corrosion wear in pipelines of nuclear power plants made of carbon steels

H. Vorona¹, M. Ananchenko¹, O. Makhnenko²

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

² E.O. Paton Electric Welding Institute, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Abstract. Many pipelines in Ukrainian nuclear power plants have been in operation for over 30 years, and the determination of the admissibility of erosion-corrosion wear (ECW) defects in the pipeline wall metal is currently one of the pressing issues in the nuclear energy sector of Ukraine. A comparative analysis of determining the admissibility of pipe wall thinning due to ECW was conducted using the adopted methodology “MT-T.0.03.224-18” by the State Enterprise “Energoatom” and the guidance based on the use of regulatory documents for designing pipeline elements. The use of the methodology demonstrated significant advantages in terms of reducing the conservatism of ECW assessment, especially for small-scale thinning and pipelines operating at pressures below 60-80 kgf/cm², which allows for a substantial reduction in repair work. However, the implementation of the methodology in practice may encounter difficulties due to the complexity and labor-intensiveness of the calculation assessment procedure for nuclear power plant personnel. Therefore, to automate the ECW admissibility assessment in accordance with the methodology requirements, software (SW) was developed for use by nuclear power plant personnel, enabling the prompt generation of a protocol for the express assessment procedure of ECW admissibility for a straight section of the pipeline based on the measurement results of wall thinning parameters in the axial direction. The software allows for concluding whether the section can be put into operation, sent for repair, or requires further refined assessment. Additionally, software based on the finite element method (FEM) was developed, which, when necessary, allows for a refined assessment of a straight section, taking into account the depth and angle of thinning in the circumferential direction, and calculates the stress of the limit plastic state of the pipeline section with ECW from the perspective of viscous fracture. The development is applicable in the field of nuclear energy in Ukraine.

Keywords: nuclear power plant, pipeline, erosion-corrosion wear, wall thinning defect, viscous fracture, stress of the limit plastic state, software, finite element method.