



УДК 519.718

П.Д. СЕСПЕДЕС ГАРСІЯ*

**ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ТРУБОПРОВОДІВ З УРАХУВАННЯМ
АНАЛІЗУ СЕГМЕНТІВ ДЕФЕКТНОЇ ОБЛАСТІ**

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

Анотація. Стаття присвячена розробці комплексного методу для оцінки залишкового ресурсу кородованого трубопроводу на основі аналізу сегментів його дефектної ділянки. Як складові методи для аналізу придатності об'єкта до подальшої експлуатації застосовано підходи, визначені міжнародними стандартами ASME B31G та API 570, а також імовірнісно-фізичну модель відмов — дифузійно монотонний DM-розподіл. Параметрами цієї моделі відмов є показник розсіювання значень випадкових величин — коефіцієнт варіації процесу деградації та математичне очікування наробітку до граничного стану. Визначальним параметром цієї моделі є залишкова товщина дефектної стінки труби, зокрема її граничне значення. Початкові параметри для методу оцінки залишкового ресурсу визначаються за результатами вимірювань глибин корозії на дефектних сегментах кородованого трубопроводу з подальшим застосуванням класичних статистичних методів обробки вихідних даних. Для прогнозування залишкового ресурсу дефектного трубопроводу було використано два методи, що ґрунтуються на ймовірнісно-фізичній моделі відмов відповідно до стандарту ДСТУ 8646, а саме: кумулятивну функцію DM-розподілу наробітку до граничного стану та гамма-відсотковий метод оцінки залишкового ресурсу. З метою забезпечення більш оптимального та коректного порівняння цих методів було виведено додаткову формулу, оскільки застосовані підходи оперують різними формами ймовірнісного представлення результатів, що потребує їх узгодженої інтерпретації. Розроблений комплексний підхід дозволяє прогнозувати залишковий ресурс дефектного трубопроводу для заданих значень імовірності безвідмовної роботи або відмови, а також для будь-яких значень наробітку до досягнення граничного стану.

Ключові слова: трубопровід, процес деградації, корозійний знос, залишковий ресурс, імовірнісно-фізична модель відмов, дифузійно монотонний DM-розподіл, ДСТУ 8646:2016, ASME B31G, API 570.

Abstract. This article focuses on the development of a comprehensive method for assessing the residual life of a corroded pipeline, based on the analysis of its segments in the defective section. Approaches defined by the international standards ASME B31G and API 570, as well as the probabilistic-physical failure model — the diffusion-monotonic DM-distribution — have been used as components of the method to analyze the pipeline's suitability for continued operation. The parameters of this failure model include the coefficient of variation of the degradation process, which reflects the dispersion of random variable values, and the mathematical expectation of the operating time to the limiting state. The key parameter of this model is the residual thickness of the defective pipe wall, particularly its threshold value. The initial parameters for the residual life estimation method are derived from measured corrosion depths in defective pipeline segments, to which classical statistical methods are subsequently applied. Two methods have been applied to predict the residual life of the defective pipeline, both based on a probabilistic-physical failure model in accordance with the DSTU 8646 standard: the cumulative DM-distribution function for operating time to the limiting state and the gamma-percentile method for residual life estimation. In order to ensure a more optimal and accurate comparison of these methods, an additional formula has been derived, since the applied approaches utilize different forms of probabilistic representation of results, which requires consistent interpretation. The developed comprehensive approach enables prediction of the residual life of the defective pipeline for specified probabilities of failure-free operation or failure, as well as for any values of operating time until the limit state is reached.

Keywords: pipelines, degradation process, corrosive wear, residual life, probabilistic-physical failure model, diffusion-monotonic DM-distribution, DSTU 8646:2016, ASME B31G, API 570.

DOI: 10.34121/1028-9763-2025-3-4-137-149

1. Вступ

Методологія визначення залишкового ресурсу дефектного трубопроводу в процесі експлуатації передбачає застосування відповідної теоретичної моделі відмов, що базується на статистичних або, в разі їх нестачі, прогнозованих даних, які слугують основою для визначення необхідних фізичних параметрів моделі. У цьому дослідженні обрано ймовірісно-фізичну модель надійності, що описується дифузійним монотонним *DM*-розподілом відмов. Цей метод дає змогу оцінювати такі показники надійності об'єкта, як загальний наробіток до граничного стану, ймовірність безвідмовної роботи протягом заданого інтервалу часу та гамма-відсотковий залишковий ресурс.

За відсутності або при обмеженому обсязі статистичних даних про дефекти трубопроводу можливе застосування альтернативних підходів для оцінки його придатності до подальшої експлуатації. Зокрема, міжнародний стандарт API 570 [1] передбачає застосування детерміністичного підходу до визначення швидкості розвитку корозійного дефекту, що дозволить спрогнозувати залишковий ресурс за умови попереднього визначення граничного значення глибини дефекту. Одним із можливих підходів до визначення цього граничного значення є поєднання підходу до визначення швидкості розвитку дефекту, передбаченого стандартом API 570, з адаптованим до нього методом із міжнародного стандарту ASME B31G [2], призначеним для оцінювання залишкової міцності трубопроводів з наявними корозійними пошкодженнями. Результатом застосування методу за стандартом ASME B31G є розрахунковий тиск руйнування, який порівнюється з робочим або максимально допустимим робочим тиском для оцінювання придатності трубопроводу з корозійним пошкодженням до подальшої експлуатації. Поєднання описаних методів дає змогу визначити один із ключових параметрів — граничне значення визначального параметра до досягнення відмови, яке необхідне для розробленої комплексної оцінки залишкового ресурсу за моделлю *DM*-розподілу відмов.

Метою статті є поєднання двох методів оцінювання стану дефектних трубопроводів для їх подальшого застосування як складової частини комплексного підходу до прогнозування наробітку до граничного стану та оцінки залишкового ресурсу технічних об'єктів на основі ймовірісно-фізичної моделі.

2. Встановлення граничного значення визначального параметра відмови об'єкта

2.1. Опис методу для визначення граничного значення визначального параметра дефекту, стандарт ASME B31G

Граничне значення визначального параметра характеризує критичну межу, після досягнення якої розміри дефекту можуть призвести до відмови. За відсутності статистичних даних щодо динаміки зміни визначального параметра дефекту та будь-якої інформації про його фактичне граничне значення, для його визначення пропонується розроблений автором комплексний підхід, сформований на основі положень галузевих стандартів ASME B31G та API 570 [3]. У межах запропонованого підходу викладені в стандартах методи розглядаються як математичні моделі для визначення граничного значення за критерієм глибини корозійного пошкодження або зменшення товщини стінки труби. Цей підхід також передбачає застосування дифузійного монотонного *DM*-розподілу відмов згідно зі стандартом ДСТУ 8646 [4], що дасть змогу оцінити залишковий ресурс, імовірність безвідмовної роботи, ймовірність відмови та загальний наробіток до граничного стану технічного об'єкта.

На початковому етапі комплексного підходу використовується метод оцінювання допустимості корозійного дефекту на трубопроводі з використанням модифікованої версії розрахунку рівня 1 відповідно до стандарту ASME B31G [2].

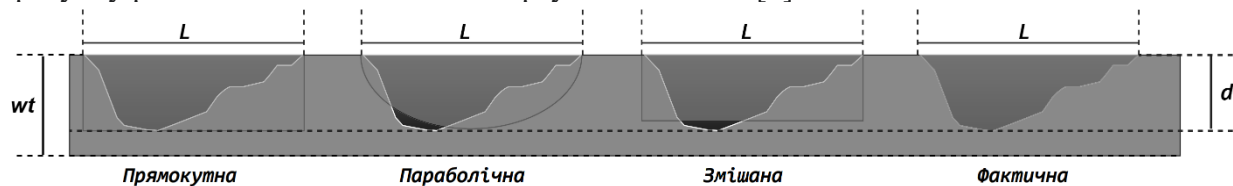


Рисунок 1 — Візуальне представлення підходів до оцінювання ділянок корозійного дефекту

В оригінальній версії розрахунку [2] зона корозії оцінюється за параболічною моделлю як $2/3(d \cdot L)$ (рис. 1), де d — глибина корозії, а L — її довжина (wt — товщина стінки). У модифікованій версії розрахунку використовується змішаний підхід $0,85(d \cdot L)$, що поєднує дві моделі оцінки: прямокутну ($d \cdot L$), яка є найпоширенішою, але має найбільшу похибку, та параболічну $2/3(d \cdot L)$. Змішана модель $0,85(d \cdot L)$ формується як комбінація з 45 % параболічної моделі та 55 % прямокутної (рис. 1): $0,85(d \cdot L) = 0,3(d \cdot L) + 0,55(d \cdot L)$ [5]. Серія розрахунків для оцінки придатності кородованого трубопроводу починається з такої формули:

$$M = \begin{cases} \sqrt{1 + 0,6275z_c - 0,003375z_c^2}, & z_c \leq 50 \\ 0,032z_c + 3,3 & , z_c \geq 50 \end{cases}, \quad (1)$$

де $z_c = \frac{L^2}{Dwt}$;

M — коефіцієнт підсилення напружень при деформації, так званий фактор Фоліаса;

z_c — коефіцієнт (coefficient) форми дефекту, який використовується для коригування напружень, що виникають внаслідок корозійних дефектів;

L — довжина корозії;

D — номінальний діаметр трубопроводу;

wt — номінальна товщина стінки трубопроводу.

Наступним кроком є визначення напруги відмови (руйнування) трубопроводу S_F за допомогою параметра S_{flow} , який характеризує напругу плинності матеріалу і застосовується для врахування пластичної деформації перед руйнуванням при оцінці залишкової міцності трубопроводу. Для звичайної вуглецевої та низьколегованої сталі значення параметру S_{flow} визначається за формулою $S_{flow} = SMYS + 68,95$ МПа згідно зі стандартом [2], де $SMYS$ — це визначена мінімальна границя плинності, тобто мінімальна напруга, при якій матеріал труби починає пластично деформуватися. Значення $SMYS$ для відповідного матеріалу труби визначається з галузевими стандартами або технічною документацією виробника. Значення напруги відмови S_F розраховується за такою формулою:

$$S_F = S_{flow} \left[\frac{1 - 0,85(d/wt)}{1 - 0,85(d/wt)/M} \right], \quad (2)$$

де S_F — прогнозований рівень напруги, що призводить до руйнування (відмови) труби;

d — глибина корозії.

Кінцевою умовою для оцінки допустимості корозійного дефекту на трубопроводі відповідно до модифікованої версії розрахунку рівня 1 стандарту ASME B31G [2] є те, що прогнозований рівень тиску відмови P_F має перевищувати робочий тиск P_O , помножений на коефіцієнт безпеки SF , тобто

$$P_F \geq (SF \cdot P_O), \quad (3)$$

де $P_F = 2S_F \cdot wt / D$;

P_F — прогнозований рівень тиску, що призводить до відмови (руйнування) труби;

SF — коефіцієнт безпеки, який враховує вплив стандартного коефіцієнта запасу міцності — $F=0,72$ [6], що застосовується у проміжних розрахунках і визначається як його обернене значення: $SF=1/F \approx 1,39$ [7];

P_O — це фактичний робочий тиск, що діє в системі під час експлуатації об'єкта і відповідно до стандарту [2], його значення може дорівнювати $MAOP$ — максимально допустимому експлуатаційному тиску.

Зі свого боку, відповідно до стандарту [6], $MAOP$ може відповідати значенню P_{DR} — розрахунковому робочому тиску, який визначається на основі характеристик труби за допомогою модифікованої формули Барлоу:

$$2wt \cdot SMYS \cdot F \cdot E \cdot T / D, \quad (4)$$

де $SMYS$ — мінімальна границя плинності матеріалу;

F — коефіцієнт запасу міцності трубопроводу, який, згідно зі стандартом [6], варіюється від 0,4 до 0,72 залежно від класу локації, що визначає рівень ризику, пов'язаний з наявністю людей, будівель та інфраструктури в районі розташування дефектного трубопроводу;

E — коефіцієнт якості поздовжнього зварного з'єднання, де $E = 1$ для безшовних труб;

T — коефіцієнт зниження температури, де $T = 1$ при експлуатаційній температурі до 121°C включно.

2.2. Опис методу для визначення граничного значення визначального параметра дефекту, стандарт API 570

Для оцінки придатності дефектного трубопроводу до подальшої експлуатації з урахуванням плинину часу за методом, описаним у стандарті [2] (п. 2.1), необхідно визначити актуальну на момент моніторингу труби швидкість розвитку дефекту, що можна зробити за допомогою детерміністичного підходу, передбаченого стандартом API 570 [1]:

$$a_c = (wt_{initial} - wt_{actual}) / (T_{actual} - T_{initial}), \quad (5)$$

де $wt_{initial}$ — номінальна товщина стінки труби;

wt_{actual} — остання зафіксована товщина стінки труби;

T_{actual} — час, в який була проведена остання фіксація товщини стінки труби;

$T_{initial}$ — час, коли труба була введена в експлуатацію.

З метою демонстрації застосування наведених у статті методів (п. 2.1–2.2) для оцінювання допустимості корозійного дефекту на трубопроводі відповідно до стандартів [1, 2] буде використано такі параметри трубопроводу [8] (табл. 1), де, відповідно до стандарту [9], мінімальна границя плинності $SMYS$ матеріалу труби ASTM A333-6=240 МПа.

Таблиця 1 — Параметри дефектного трубопроводу

Тип об'єкта	Матеріал об'єкта	Зовнішній діаметр об'єкта, D	Товщина стінки об'єкта, wt	Довжина дефекту, L	Глибина дефекту, d
DN40	A333-6	48,3 мм	7,14 мм	40 мм	2,14 мм

Використовуючи детерміністичний підхід для розрахунку лінійно-екстрапольованої швидкості зростання дефекту (5) для параметрів d та L , виконується серія розрахунків для

прогнозування зміни розмірів корозії у будь-який момент часу. Це, зі свого боку, дозволить оцінити придатність дефектного трубопроводу до подальшої експлуатації у визначений момент часу відповідно до методу [2], який передбачає прогнозування рівня тиску, що здатний призвести до відмови (руйнування) об'єкта. Інакше кажучи, виконуються розрахунки за стандартом ASME B31G із поступовим збільшенням значень розмірів дефекту відповідно до швидкості його зростання, визначеної за стандартом API 570, — до моменту, коли, згідно з умовою (3), буде встановлено, що дефект є неприпустимим (табл. 2). З огляду на значну кількість ітераційних розрахунків, передбачених описаним підходом, для зручності та оптимізації обчислювального процесу серію розрахунків доцільно виконувати із застосуванням програмних засобів. У доповнення до табл. 1 припустимо, що умовний наробіток дефектного трубопроводу на момент контролю його стану становить $\tau = 23$ роки.

Таблиця 2 — Прогнозовані значення довжини L та глибини d дефекту, а також відповідні розраховані значення тиску відмови P_F

Рік	$L, \text{мм}$ $d, \text{мм}$	29,50 (29 рок. і 6 міс.)	29,58 (29 рок. і 7 міс.)	29,67 (29 рок. і 8 міс.)	29,75 (29 рок. і 9 міс.)	29,83 (29 рок. і 10 міс.)	29,92 (29 рок. і 11 міс.)	30 (30 рок. і 0 міс.)
		51,30	51,45	51,59	51,74	51,88	52,03	52,17
29,50 (29 рок. і 6 міс.)	2,74	71,35*	71,33	71,30	71,28	71,25	71,23	71,20
29,58 (29 рок. і 7 міс.)	2,75	71,29	71,26*	71,24	71,21	71,19	71,16	71,14
29,67 (29 рок. і 8 міс.)	2,76	71,22	71,20	71,17*	71,15	71,12	71,10	71,07
29,75 (29 рок. і 9 міс.)	2,77	71,16	71,13	71,11	71,08*	71,06	71,03	71,01
29,83 (29 рок. і 10 міс.)	2,78	71,09	71,07	71,04	71,01	70,99*	70,96	70,94
29,92 (29 рок. і 11 міс.)	2,78	71,03	71,00	70,97	70,95	70,92	70,90*	70,87
30 (30 рок. і 0 міс.)	2,79	70,96	70,93	70,91	70,88	70,86	70,83	70,81*
Результати розрахованих значень тиску відмови P_F (МПа) залежно від прогнозованих довжин L та глибин d дефекту для різних моментів у часі								

*Примітка: значення тиску відмови P_F слід розраховувати з урахуванням параметрів довжини L та глибини d дефекту, які узгоджені за часом, тобто визначені для одного й того самого моменту у часі.

Допустимі значення тиску відмови P_F , що залежать від прогнозованих за стандартом API 570 розмірів дефекту L та d , мають задовольняти умову (3). У табл. 2 допустимі значення параметра P_F наведені у білих комірках, тоді як значення, що не задовольняють умову (3), — у темних. Наведена версія таблиці (табл. 2) представлена у скороченому вигляді та містить лише ті значення років експлуатації й відповідних їм прогнозованих розмірів дефекту, для яких розраховані значення тиску відмови P_F переходять з допустимих у недопустимі. Цей перехід відбувається на 29-му (29,92) році експлуатації, коли перестає задовольнятися умова (3), що свідчить про досягнення визначальним параметром (глибиною корозійного дефекту) свого граничного значення $d_f \approx 2.78$ мм. Тобто, відповідно до модифікованої версії розрахунку рівня 1 стандарту ASME B31G [2], труба з поточними розмірами корозійного дефекту на момент часу (29 років 11 місяців) не відповідає вимогам для подальшої експлуатації.

3. Визначення залишкового ресурсу дефектного трубопроводу, стандарт ДСТУ 8646

3.1. Ймовірнісно-фізична модель відмов, дифузійно-монотонний DM -розподіл для оцінювання наробітку до граничного стану

Для застосування ймовірнісно-фізичної моделі прогнозування залишкового наробітку до граничного стану на основі дифузійно-монотонного DM -розподілу спочатку необхідно визначити параметри форми ν та масштабу μ [4]. З цією метою на дефектній ділянці трубопроводу виконують вимірювання глибини корозії на умовних $n=30$ сегментах P_i рівномірно розташованих по окружності його поперечного перерізу. При цьому збільшення кількості сегментів зменшує похибку при оцінюванні параметрів DM -розподілу, що підвищує достовірність кінцевих розрахунків. Такий підхід дозволяє враховувати вплив окружних напружень, що виникають під дією внутрішнього тиску, на ослаблені корозією ділянки стінки труби, які є основним фактором потенційного розриву вздовж її осі (рис. 2).

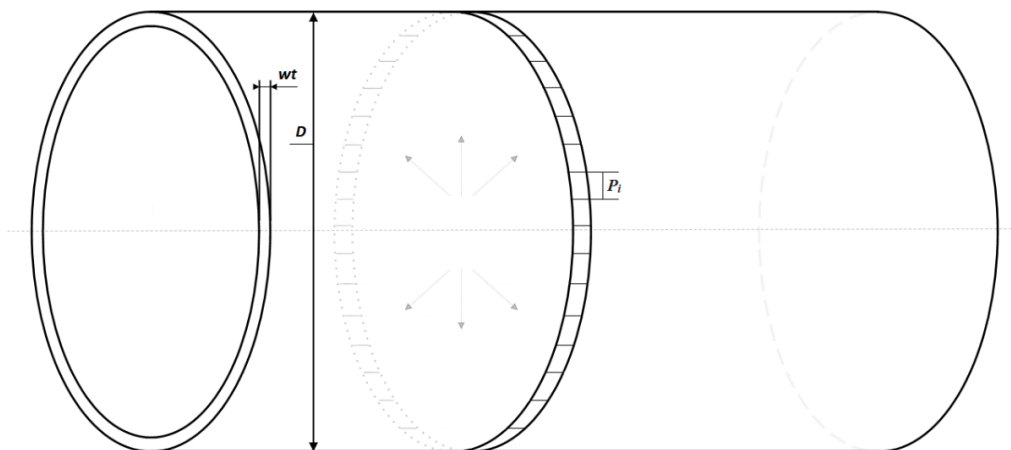


Рисунок 2 — Ілюстрація трубопроводу з ділянкою, поділеною на рівномірно розташовані по окружності поперечного перерізу сегменти для вимірювання глибини корозії

В доповнення до табл. 1 розглядається умовна вибірка вимірних глибин корозії для подальшого розрахунку параметрів DM -розподілу (в мм): $P=\{0,2; 0,4; 0,7; 1; 1; 1,1; 1,4; 1,9; 1,3; 0,9; 0,8; 0,6; 1; 1,1; 1,1; 1,2; 1,5; 2; 2,2; 2,1; 1,7; 1,3; 1,2; 1,1; 1,1; 1; 0,9; 0,7; 0,6; 0,3\}$.

Розпочнемо з визначення параметра масштабу μ (математичного сподівання наробітку до відмови), яке обчислюється за допомогою визначеного в попередньому розділі (2.2)

граничного значення визначального параметра d_f (2.78 мм), наробітку τ (23 роки) та середньої швидкості саме процесу деградації, тобто, враховуючи лише додатні (ненульові) значення P^* , де n^* — кількість елементів у вибірці P^* :

$$\mu = \frac{d_f n^*}{\sum_{i=1}^{n^*} \frac{P_i^*}{\tau}}, \quad (6)$$

де $P^* = \{P_i \in P \mid P_i \neq 0\}$; $n^* = |P^*|$;

$P^* = \{0,2; 0,4; 0,7; 1; 1; 1,1; 1,4; 1,9; 1,3; 0,9; 0,8; 0,6; 1; 1,1; 1,1; 1,2; 1,5; 2; 2,2; 2,1; 1,7; 1,3; 1,2; 1,1; 1,1; 1; 0,9; 0,7; 0,6; 0,3\}$; $n^* = 30$.

Також необхідно визначити параметр форми v [10], коефіцієнт варіації дефекту (глибин корозії), за допомогою середнього значення $\bar{P}^*$, з вибірки глибин корозії P^* :

$$v = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^*} (P_i^* - \bar{P}^*)^2}}{\bar{P}^* \sqrt{n^* - 1}}, \quad (7)$$

$$\text{де } \bar{P}^* = \frac{\sum_{i=1}^{n^*} P_i^*}{n^*}.$$

За початковими результатами спостережень P визначені параметри функції DM -розподілу μ та v , які характеризують розташування розподілу на тимчасовій осі, а також його вид і форму. Наступним етапом є визначення методів використання розподілу та його параметрів для оцінки залишкового ресурсу трубопроводу.

3.2. Загальний наробіток до граничного стану, кумулятивна функція DM -розподілу

Оскільки в рамках цієї роботи як імовірнісну модель відмов обрано дифузійно-монотонний DM -розподіл, відповідно до положень стандарту [4], для оцінювання залишкового ресурсу використовується кумулятивна функція розподілу загального наробітку до граничного стану $F(t)$, яка визначається через інтеграл функції нормованого нормального розподілу після встановлення параметрів масштабу μ та форми v . У цьому виразі t — це довільне значення наробітку, а $F(t)$ виражає ймовірність того, що відмова настане до моменту часу t . Формула кумулятивної функції розподілу має такий вигляд:

$$F(t) = DM(t; \mu; v) = \Phi\left(\frac{t - \mu}{v\sqrt{\mu t}}\right), \quad (8)$$

$$\text{де } \Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-U^2/2} dU.$$

Інтегральну функцію $\Phi(z)$ (8) нормованого (стандартного) нормального розподілу можна обчислити чисельно за класичним методом трапецій. Однак для досягнення необхідної точності результатів цей підхід потребує значної кількості ітераційних розрахунків, що обумовлює застосування програмних засобів для автоматизації обчислень. У зв'язку з цим, функцію $\Phi(z)$ доцільно представити через функцію помилок $erf(x)$ [11], що значно спростує поставлену задачу при виконанні великої кількості обчислень:

$$\Phi(z) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{z}{\sqrt{2}} \right) \right], \quad (9)$$

$$\text{де } z = \left(\frac{t - \mu}{v\sqrt{\mu t}} \right).$$

Саму функцію помилок $\operatorname{erf}(x)$ можна обчислити за чисельною апроксимацією, наведеною в математичному довіднику [11], що забезпечує відхилення результатів у межах 3×10^{-7} :

$$\operatorname{erf}(x) \approx \frac{1}{(1 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_6 x^6)^{16}}, \quad x \geq 0, \quad (10)$$

де апроксимаційні коефіцієнти: $a_1 = 0,0705230784$, $a_2 = 0,0422820123$, $a_3 = 0,0092705272$, $a_4 = 0,0001520143$, $a_5 = 0,0002765672$, $a_6 = 0,0000430638$.

Для застосування чисельної апроксимації (10) до від'ємних значень x необхідно враховувати, що функція $\operatorname{erf}(x) = -\operatorname{erf}(-x)$. Відповідно, вираз (9) набуває такого вигляду:

$$\Phi(z) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{sgn}(z) \cdot \operatorname{erf} \left(\operatorname{sgn}(z) \frac{z}{\sqrt{2}} \right) \right]. \quad (11)$$

Отже, з урахуванням вибірки P та згідно з формулами (6, 7), параметри масштабу μ та форми v набувають значень $\mu \approx 57,43$ та $v \approx 0,45$ відповідно. Застосовуючи формули (11, 10) для обчислення інтегралу функції DM -розподілу (8), визначаємо ймовірність (p) того, що об'єкт досягне граничного стану при наробітку, що відповідає t рокам (табл. 3).

Таблиця 3 — Ймовірності відмови p за DM -розподілом при різних значеннях наробітку t

t (роки)	10	20	28	30	40	50	60	70	80	90	100
z	-4,38	-2,45	-1,6	-1,46	-0,81	-0,31	0,097	0,439	0,737	1,003	1,244
$\operatorname{erf}(x)$	1	0,986	0,9	0,857	0,579	0,241	0,077	0,339	0,539	0,684	0,786
$F(t), p$	0	0,007	0,05	0,072	0,21	0,379	0,539	0,67	0,769	0,842	0,893

Результати розрахунків (табл. 3) за кумулятивною функцією DM -розподілу демонструють, що з імовірністю близько $\approx 0,05$ об'єкт досягне свого граничного стану до 28-го року експлуатації, що відповідає загальноприйнятому рівню допустимого ризику відмови згідно з інженерною практикою. Це вказує на наявну, хоча й незначну, ймовірність відмови у зазначений період. Враховуючи наробіток $\tau = 23$ роки, залишковий ресурс трубопроводу оцінюється приблизно у 5 років, що відповідає періоду, впродовж якого об'єкт, з імовірністю близько $\approx 0,95$, залишатиметься придатним до експлуатації.

3.3. Залишковий термін служби, гамма-відсотковий метод

Відповідно до стандарту ДСТУ 8646, залишковий термін служби можна спрогнозувати за допомогою гамма-відсоткового методу $\pi_\gamma(\tau)$, де квантиль нормованого нормального розподілу U_{γ^*} можна визначити за скороченою таблицею, наведеною в стандарті [4]. Формула гамма-відсоткового залишкового ресурсу має такий вигляд:

$$\pi_\gamma(\tau) = \mu \left(1 + \frac{v^2 U_{\gamma^*}^2}{2} - v U_{\gamma^*} \sqrt{1 + \frac{v^2 U_{\gamma^*}^2}{4}} \right) - \tau, \quad (12)$$

$$\text{де } \gamma^* = \gamma \cdot \Phi \left(\frac{\mu - \tau}{v \sqrt{\mu \tau}} \right);$$

U_{γ^*} — квантиль нормованого нормального розподілу рівня γ^* .

Для підвищення точності квантиль нормованого нормального розподілу U_{γ^*} можна обчислити як значення оберненої кумулятивної функції нормованого нормального розподілу для заданої ймовірності γ . Для цього використовується квантильна функція нормованого нормального розподілу (13), яка є оберненою до кумулятивної функції розподілу (8) і може бути виражена через обернену функцію помилок $\text{erf}^{-1}(x)$, що дозволить із більшою точністю розрахувати значення квантиля U_{γ^*} для будь-якої ймовірності γ :

$$U_{\gamma^*} = \Phi^{-1}(\gamma^*) = \sqrt{2} \cdot \text{erf}^{-1}(2\gamma^* - 1). \quad (13)$$

Обернена функція помилки $\text{erf}^{-1}(x)$ може бути обчислена за допомогою чисельного методу Ньютона-Рафсона, кількість ітерацій якого залежить від необхідної точності, тож через значний обсяг розрахунків доцільно використовувати програмну реалізацію. Щоб уникнути надмірної кількості обчислень, доцільно застосувати аналітичну апроксимацію оберненої функції помилки $\text{erf}^{-1}(x)$ (14) із приблизною похибкою в 4×10^{-3} [12], при цьому необхідно обов'язково враховувати знак аргументу x :

$$\text{erf}^{-1}(x) \approx \text{sgn}(x) \sqrt{\left[-\frac{2}{\pi a} - \frac{\ln(1-x^2)}{2} + \sqrt{\left(\frac{2}{\pi a} + \frac{\ln(1-x^2)}{2} \right)^2 - \frac{1}{a} \ln(1-x^2)} \right]}, \quad (14)$$

$$\text{де } a = \frac{8}{3\pi} \cdot \frac{\pi - 3}{4 - \pi} \approx 0,14.$$

Знаючи наробіток об'єкта τ (23 роки) та використовуючи описані методи розрахунку (13, 14) для визначення гамма-відсоткового залишкового ресурсу (12), отримуємо значення залишкового ресурсу t (безвідмовної роботи за заданою ймовірністю) у межах імовірностей від 0,01 до 0,99. Ці значення (t) відображають залишкову тривалість експлуатації, протягом якої об'єкт з імовірністю γ не досягне свого граничного стану, тобто залишатиметься працездатним (табл. 4).

Таблиця 4 — Залишковий ресурс t (роки) за гамма-відсотковим методом при різних заданих значеннях імовірності γ

γ	0,01	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,99
$\text{erf}^{-1}(x)$	-1,65	-1,17	-0,91	-0,6	-0,4	-0,19	-0,02	0,16	0,35	0,56	0,84	1,06	1,35

Продовж. табл. 4

U_{γ^*}	-2,33	-1,65	-1,29	-0,85	-0,5	-0,27	-0,02	0,23	0,49	0,8	1,19	1,5	1,91
$\pi_{\gamma}(\tau), t$	134,4	96,17	79,1	61,29	50,3	41,9	35,02	28,9	23,08	17,3	10,7	6,57	1,83

Гамма-відсотковий метод оцінювання залишкового ресурсу за стандартом ДСТУ 8646 дає змогу визначити, що з імовірністю 0,95 об'єкт залишатиметься в працездатному стані щонайменше протягом наступних ≈ 7 років, що відповідає загальноприйнятому рівню ймовірності безвідмовної роботи в інженерній практиці.

3.4. Порівняння методів визначення залишкового терміну служби трубопроводу

Для забезпечення більш точного порівняння результатів прогнозування ймовірності досягнення об'єктом граничного стану за кумулятивною (інтегральною) функцією DM -розподілу $F(t)$ (8) із результатами, отриманими гамма-відсотковим методом оцінки залишкового ресурсу $\pi_{\gamma}(\tau)$ (12), було виведено формулу оберненої кумулятивної функції DM -розподілу $F(p)$ (15). Ця функція (15) відтворює ті самі результати, що й оригінальна функція (8), але водночас спрощує порівняння методів, оскільки дозволяє визначати саме час t досягнення об'єктом граничного стану для заданої ймовірності p , на відміну від оригінальної функції (8), яка розраховує залежність ймовірності p від часу t , тобто: $F(t)=DM(t; \mu; \nu)=p$ (8); $F(p)=DM^{-1}(p; \mu; \nu)=t$ (15). Для встановлення значення z (z -оцінки) використовується квантильна функція нормованого нормального розподілу $\Phi^{-1}(p)$, яка виражається через обернену функцію помилок $erf^{-1}(x)$ (13):

$$F(p) = DM^{-1}(p; \mu; \nu) = \frac{\mu}{2} \left(2 + (z\nu)^2 + \operatorname{sgn}(z)|z\nu|\sqrt{4 + (z\nu)^2} \right), \quad (15)$$

де z — (z -оцінка) статистична міра, що характеризує відхилення значення параметра часу t від його математичного очікування з урахуванням варіативності статистичних даних початкової вибірки P , тобто $z=\Phi^{-1}(p)=\sqrt{2} \cdot erf^{-1}(2p-1)$ (13).

Результати, отримані за гамма-відсотковим методом оцінки залишкового ресурсу (12), протилежні за суттю результатам методу на основі інтегральної функції DM -розподілу (8, 15), оскільки гамма-відсотковий метод визначає період часу, протягом якого об'єкт із заданою ймовірністю не досягне свого граничного стану, тоді як кумулятивна функція DM -розподілу характеризує ймовірність саме досягнення об'єктом граничного стану за заданий період часу. Щоб підтвердити це, спочатку узгодимо обидва підходи, а потім виконаємо порівняльні розрахунки на основі вихідних даних, що використовувалися в попередніх обчисленнях.

Для узгодження цих підходів ймовірність (γ) у формулі гамма-відсоткового методу (12) слід розглядати як ймовірність протилежної події, тобто $1-\gamma$. Це дозволить інтерпретувати результати аналогічно до оберненої кумулятивної функції DM -розподілу $F(p)$ (15), як період часу, протягом якого об'єкт з ймовірністю $p=1-\gamma$ саме досягне граничного стану $\pi_p(\tau)$, на відміну від оригінальної формули гамма-відсоткового методу $\pi_{\gamma}(\tau)$, де визначається період безвідмовної роботи з заданою ймовірністю γ .

При виконанні розрахунків, проведених за формулою оберненої кумулятивної функції DM -розподілу $F(p)$ (15), для переходу від концепції загального наробітку до залишкового ресурсу необхідно скоригувати отримані результати, віднявши від них фактичний наробіток $\tau=23$ роки. Внесені зміни до формули оберненої кумулятивної функції DM -розподілу, а саме $F(p)-\tau$, забезпечують концептуальну узгодженість отриманих результатів із результатами, одержаними за узгодженим гамма-відсотковим методом $\pi_p(\tau)$, оскільки після цих змін обидва

підходи визначають саме залишковий ресурс — час до досягнення об'єктом граничного стану після наробітку τ із заданою ймовірністю p , що дає змогу коректно їх порівнювати.

Таблиця 5 — Значення залишкового ресурсу t , отримані за узгодженими гамма-відсотковим методом * і оберненою кумулятивною функцією DM -розподілу * для значень ймовірності γ

γ	0,01	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,99
$F(\gamma),$ t_t	21,01	27,78	32,45	39,36	45,3	51,2	57,4	64,4	72,7	83,8	101,6	118,7	157,0
$\pi_\gamma(\tau),$ t	134,4	96,17	79,1	61,29	50,3	41,9	35,0	28,9	23,1	17,25	10,7	6,57	1,83
$^*F(\gamma)-\tau,$ t	0	4,78	9,45	16,36	22,3	28,2	34,4	41,4	49,7	60,8	78,64	95,73	134,0
$^*\pi_p(\tau),$ t	1,83	6,57	10,71	17,25	23,1	28,9	35,0	41,9	50,3	61,29	79,1	96,17	134,4

Примітка: t_t — загальний ресурс, $^*F(\gamma)-\tau$ — узгоджена версія методу на основі інтегральної функції DM -розподілу (8), $^*\pi_p(\tau)$ — узгоджена версія гамма-відсоткового методу (12).

Результати розрахунків (табл. 5) загального ресурсу об'єкта за інтегральною функцією DM -розподілу виконані з використанням її оберненої функції $F(p)$ (15) (де $p = \gamma$, тобто $F(\gamma)$). Отримані значення еквівалентні тим, що визначаються за оригінальною формулою (8), однак використання оберненої функції необхідне для подальшого узгодження її результатів із результатами гамма-відсоткового методу. Це пояснюється тим, що обернена функція визначає саме час t , за який об'єкт із заданою ймовірністю p досягне граничного стану, тоді як в оригінальному виразі (8) все навпаки — функція розподілу $F(t)$ визначає саме ймовірність того, що об'єкт досягне граничного стану до заданого часу t . А щоб привести значення загального ресурсу до залишкового, необхідно відняти від нього загальний наробіток τ , тобто $^*F(\gamma)-\tau$.

Значення гамма-відсоткового залишкового ресурсу $\pi_\gamma(\tau)$ визначаються за оригінальною формулою (12) без змін. Для подальшого узгодження цієї формули з виразом $^*F(\gamma)-\tau$ у формулі (12) ймовірність γ замінюється на ймовірність протилежної події $p = 1 - \gamma$, після чого вираз приймає вигляд $^*\pi_p(\tau)$. Такий підхід забезпечує узгодженість та спільний напрямок інтерпретації результатів гамма-відсоткового методу з результатами, отриманими за допомогою узгодженої оберненої кумулятивної функції DM -розподілу, дозволяючи обом підходам визначати час до досягнення об'єктом граничного стану t для заданого рівня ймовірності γ .

Розрахункові значення, отримані після описаних змін у формулах $F(p)$ (де $p = \gamma$) (15) та $\pi_\gamma(\tau)$ (12), підтверджують коректність застосованих методів. Зокрема, значення виразів $^*F(\gamma)-\tau$ та $^*\pi_p(\tau)$ є близькими за значеннями, що підтверджується даними з табл. 5.

На рис. 3 використана обернена кумулятивна функція DM -розподілу $F(\gamma)$ (15) (де $\gamma = p$), яка відтворює ті самі результати, що й оригінальна кумулятивна функція DM -розподілу $F(t)$ (8), оскільки обидві описують залежність між загальним наробітком до граничного стану t та відповідною ймовірністю γ (або p), але розраховують цю залежність у різних напрямках: оригінальна формула (8) визначає ймовірність при заданому наробітку, тоді як обернена (15) — наробіток при заданій ймовірності. Для коректного порівняння результатів оберненої кумулятивної функції DM -розподілу $F(\gamma)$ (15) з результатами оригінальної гамма-відсоткової функції $\pi_\gamma(\tau)$ (12) обидва методи було приведено до єдиного концептуального вигляду ($^*F(\gamma)-\tau$ і $^*\pi_p(\tau)$). Це обґрунтовано тим, що гамма-відсотковий метод орієнтований на визначення саме залишкового наробітку — часу, протягом якого об'єкт із заданою ймовірністю γ залишатиметься у працездатному стані, тоді як обернена кумулятивна

функція DM -розподілу описує ймовірність досягнення об'єктом граничного стану до заданого моменту часу t , тобто оцінює загальний наробіток. Запропонований підхід передбачає використання ймовірностей відмови як вхідних параметрів у обох методах і визначення залишкового наробітку до граничного стану як єдиного вихідного параметра. Отже, шляхом віднімання наробітку τ від значень, отриманих з оберненої кумулятивної функції DM -розподілу, визначається залишковий ресурс, ${}^*F(\gamma) - \tau$. А перехід від початкової ймовірності γ до ймовірності протилежної події ($p = 1 - \gamma$) у формулі гамма-відсоткового методу змінює трактування результату: замість часу, протягом якого об'єкт із вказаною ймовірністю не досягне свого граничного стану $\pi_\gamma(\tau)$, ми отримуємо час, за який об'єкт із заданою ймовірністю його досягне $\pi_p(\tau)$. Тобто, на рис. 3 основні суцільні лінії відображають результати оригінальних методів згідно зі стандартом [4], а пунктирні* — результати тих самих методів, але концептуально узгоджених, які після змін мають спільний напрямок інтерпретації для коректного порівняння результатів.

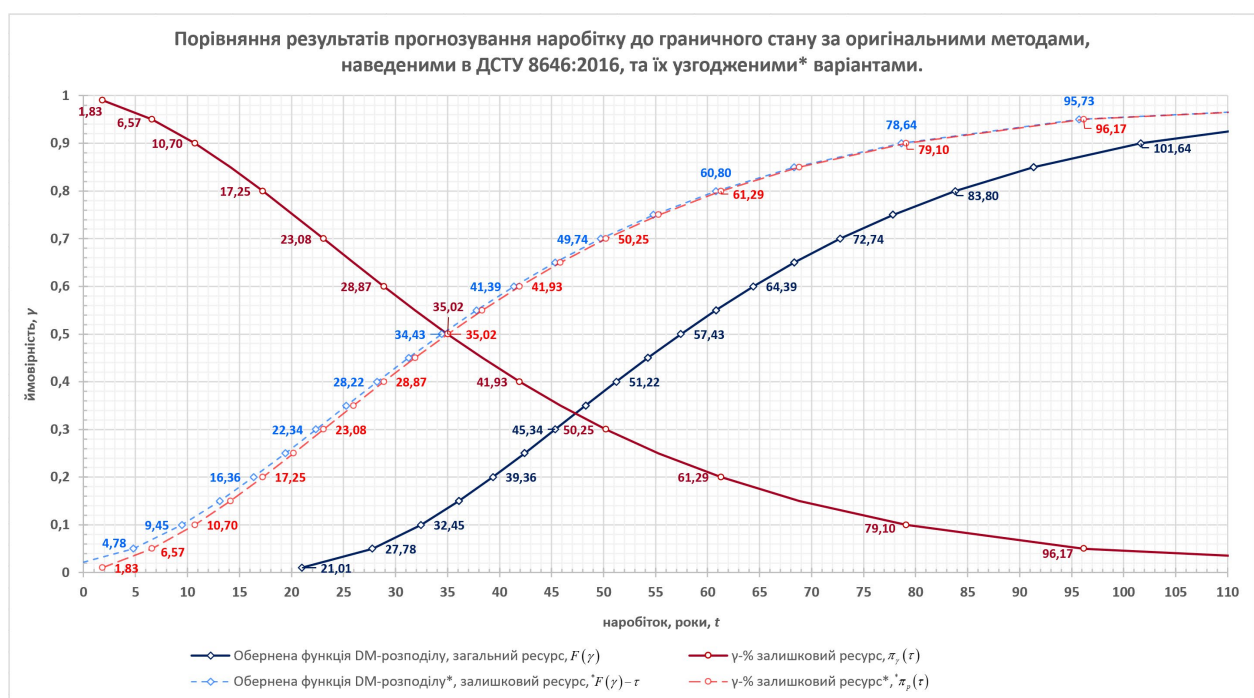


Рисунок 3 — Графіки значень наробітку t при ймовірності γ , отримані за оригінальними методами з ДСТУ 8646 та їх концептуально узгодженими* варіантами

4. Висновки

Опрацювавши методичні підходи, що базуються на стандартах ASME B31G та API 570, у рамках загальної методики оцінювання залишкового ресурсу трубопроводу розроблено комплексний метод до визначення граничного значення визначального параметра відмови. Для реалізації запропонованої методики було використано модель дифузійно-монотонного DM -розподілу, зокрема її кумулятивну функцію та гамма-відсотковий метод, які, з урахуванням параметрів масштабу μ та форми ν , дають змогу описувати випадкові фізичні процеси, що впливають на термін служби технічних об'єктів.

Відповідно до стандарту ДСТУ 8646, на основі результатів спостережень умовної вибірки значень глибин корозії залишковий термін служби кородованого трубопроводу оцінено з використанням визначеного граничного значення визначального параметра відмови та концептуально узгоджених функцій DM -розподілу $F(t)$ і гамма-відсоткового методу $\pi_\gamma(\tau)$ (розділ 3.4). Запропонований у роботі метод отримання репрезентативної вибірки зразків для

прогнозування залишкового ресурсу трубопроводу загалом вимагає подальшої практичної апробації та теоретичного обґрунтування. Оцінюючи залишковий ресурс, зазвичай обирають рівень імовірності безвідмовної роботи $\gamma=0,95$ як поширений інженерний стандарт [13], що відображає раціональний компроміс між вимогами безпеки та економічною доцільністю. Результати розрахунків (рис. 3) демонструють, що при ймовірності відмови $\gamma=0,05$ (що відповідає ймовірності безвідмовної роботи 0,95) оцінка залишкового ресурсу трубопроводу, з урахуванням узгоджених виразів, наведених у розділі 3.4, знаходиться в межах від 4,5 до 6,5 років. Порівняння цих результатів із комплексним методом, описаним у розділі 2.2, де прогнозований загальний ресурс становить 29,92 років, підтверджує його близьку відповідність до методів *DM*-розподілу, наведених у розділі 3.4, оскільки додавання наробітку τ до отриманих значень залишкового ресурсу дає загальний ресурс у межах від 27,5 до 29,5 років.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. API 570. Piping Inspection Code: In-service Inspection, Rating, Repair, and Alteration of Piping Systems. American Petroleum Institute, 2024. URL: <https://www.apiwebstore.org/standards/570>.
2. ASME B31G-2023. Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines. Supplement to ASME B31 Code for Pressure Piping. The American Society of Mechanical Engineers, 2023. URL: <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/b31g-manual-determining-remaining-strength-corroded-pipelines>.
3. Сеспедес Гарсія П.Д. Методи оцінки залишкового ресурсу кородованих газових трубопровідних систем. *Математичні машини і системи*. 2023. № 3. С. 134–150.
4. ДСТУ 8646:2016. Оцінювання і прогнозування залишкового ресурсу (терміну служби) технічних систем. Державний Стандарт України, 2016.
5. Amaya-Gómez R., Sánchez-Silva M., Bastidas-Arteaga E., Schoefs F., Munoz F. Reliability assessments of corroded pipelines based on internal pressure. *Engineering Failure Analysis*. 2019. Vol. 98. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.01.064>.
6. ASME B31.8:2022. Gas Transmission and Distribution Piping Systems. ASME Code for Pressure Piping, B31. The American Society of Mechanical Engineers, 2022. URL: <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/b31-8-gas-transmission-distribution-piping-systems>.
7. Chen J., Li M.F., Wang J.H., Wang X.L. A Study on the Safety Factor for Corrosion Assessment of Oil and Gas Pipeline through In-Line Inspection. *KEM*. 2019. N 795. P. 233–238. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.795.233>.
8. Li Q., Zhang L., Wang J. et al. Applicability evaluation technology for steel small diameter pipes containing external surface corrosion defects. *Sci Rep*. 2024. N 14. P. 25803. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-77098-y>.
9. ASTM A333/A333M-18. Standard Specification for Seamless and Welded Steel Pipe for Low-Temperature Service and Other Applications with Required Notch Toughness. ASTM International, 2018. 8 p.
10. He X., Oyadiji S.O. Application of coefficient of variation in reliability-based mechanical design and manufacture. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001. N 119. URL: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00938-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00938-4).
11. Abramowitz M., Stegun I.A. Handbook of Mathematical Functions: with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, 1964. 1064 p.
12. Winitzki S. A handy approximation for the error function and its inverse. 2008. 3 p.
13. EN 1990:2002. Eurocode — Basis of structural design, European Committee for Standardization, 2002. 116 p.

Стаття надійшла до редакції 14.07.2025