

## ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ ЕЛЕМЕНТІВ ТРУБОПРОВОДУ З УРАХУВАННЯМ ПРОЦЕСІВ НАКОПИЧЕННЯ ВТОМИ ТА РОЗВИТКУ КОРОЗІЇ

*В даній роботі проводиться аналіз впливу об'ємного поверхневого корозійного дефекту та втомних пошкоджень на надійність коліна магістрального трубопроводу. Для цього було створено параметричну модель трубопроводу з корозійним дефектом, що розвивається стохастично та підпорядковується лог-нормальному закону розподілення. На основі побудованої моделі було проведено серію типових розрахунків для визначення НДС трубопроводу з дефектом, який відповідає різним термінам експлуатації. З використанням отриманих даних для НДС конструкції та розробленої математичної моделі для визначення накопичення втомних пошкоджень отримано параметр пошкоджуваності та ймовірність безвідмовної роботи для конструкції при різному значенні внутрішнього навантаження та з дефектом, який відповідає різним термінам експлуатації.*

*Ключові слова: корозія, магістральний трубопровід, втома, надійність, стохастичність.*

K.E. POTOPALSKA, O.O. LARIN

National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"

### EVALUATION AND FORECASTING OF RESOURCE ELEMENTS OF THE PIPELINE TAKING INTO ACCOUNT THE PROCESSES OF ACCUMULATION OF FATIGUE AND CORROSION DEVELOPMENT

*The aim of the research – to analyze of the influence of a volumetric surface corrosion defect and fatigue damage on the reliability of the main pipeline's elbow. The parametric model of defected pipeline was created. Volumetric corrosion defect is modelled as stochastically developing and obeys to the lognormal distribution law. Based on the constructed model, series of typical calculations were conducted for determining the stress-strain state of the pipeline with defect that corresponds to different operation terms. Using the obtained data for the construction stress-strain state and the developed mathematical model for determining the accumulation of fatigue damage, the damage parameter and probability of failure operation for the design at different values of the internal loading and with a defect that corresponds to different terms of operation was received. It has been determined a probability of failure during the operation of a damaged pipeline's elbow with the maximum possible load in all relevant areas.*

*Key words: corrosion, main pipeline, fatigue, reliability, stochasticity.*

#### Вступ

Магістральні трубопроводи є одним із найбільш поширених засобів транспортування нафти і газу в Світі, який забезпечує високі показники безпеки та економічності. За рахунок того, що зазвичай дані конструкції використовуються довготривало, вони схильні до появи різноманітних дефектів та пошкоджень. Такі пошкодження можуть виникати за рахунок дії агресивного середовища, зокрема при взаємодії з ґрунтом, в якому знаходиться трубопровід, механічних пошкоджень та інше. Одним з найбільш поширених типів є дефекти корозійної природи. Розвиток поверхневих дефектів корозійного типу відбувається випадково, тому процес їх зростання слід розглядати у ймовірнісній постановці. З іншого боку, в наслідок дії циклічного внутрішнього навантаження (пульсації тиску) у трубопроводі відбувається процес накопичення втоми. Дані процеси (поява корозійних дефектів та накопичення втоми) відбуваються одночасно та мають суттєвий вплив на довготривалу міцність трубопроводу. Тому своєчасне діагностування дефектів та прогнозування ресурсу трубопроводу з урахуванням одночасного протікання зазначених процесів є вкрай важливою задачею.

#### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідженню залишкового ресурсу пошкоджених магістральних трубопроводів приділено багато уваги вітчизняними та закордонними вченими. Існуючі дослідження можна умовно поділити на ті, які зосереджені на оцінці залишкової міцності конструкції з дефектом та ті, в яких проведена оцінка накопичення втомних пошкоджень в елементах магістральних трубопроводів. У той же час дослідження накопичення втоми проводяться або експериментально, в даних дослідженнях вивчається поведінка матеріалу з якого вироблено трубопровід на основі досліджень напружено-деформованого стану одновісного зразка [1–3] або циліндричної оболонки [4, 5] та ті, в яких використовуються повні скінчено-елементні моделі для визначення НДС та на основі цих результатів проводиться оцінка накопичення втомних пошкоджень [4, 6].

Наприклад, у роботі [7] досліджено процес накопичення втомних пошкоджень у коліні трубопроводу зі стоншеною стінкою, при чому розглядається конструкція без дії внутрішнього навантаження. Також варто відмітити, роботу, в якій досліджується трубопровід з дефектом типу «вм'ятина». В даних роботах проводяться експериментальні та чисельні дослідження.

Необхідно виділити дослідження [1] в якому проводилась оцінка накопичення малоциклової втоми в трубопроводі з одиночним корозійним дефектом. В даній роботі корозійний дефект задавався з постійними розмірами, та не враховувався його розвиток у часі. Оцінка накопичення втомних пошкоджень проводилась з використанням моделі Менсона-Кофіна.

В цілому можна зробити висновок, що розвиток втомних процесів у матеріалі трубопроводу значно впливає на його залишковий ресурс, як і корозійні пошкодження. Тому оцінювати надійність трубопроводу необхідно враховуючи ці обидва процеси.

**Метою даної роботи** є дослідження впливу об'ємного дефекту корозійної природи, що знаходиться на поверхні криволінійної ділянки трубопроводу, який для різного рівня розвитку заданий статистично та його вплив на залишковий ресурс при відмовах, що викликані багато- та малоцикловою втомою.

Для досягнення мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- Створення параметричної моделі коліна трубопроводу з корозійним дефектом з різними розмірами.
  - Проведення типових розрахунків для визначення НДС конструкції з дефектом з різними розмірами, які генеруються випадково в залежності від терміну експлуатації.
  - З використанням отриманих даних НДС визначити закономірність накопичення параметру пошкоджуваності для трубопроводу з дефектом при експлуатаційному навантаженні.
  - Визначити ймовірність безвідмовної роботи коліна трубопроводу з дефектом.
- Рішення даних задач можна розділити, як це показано на рис. 1.

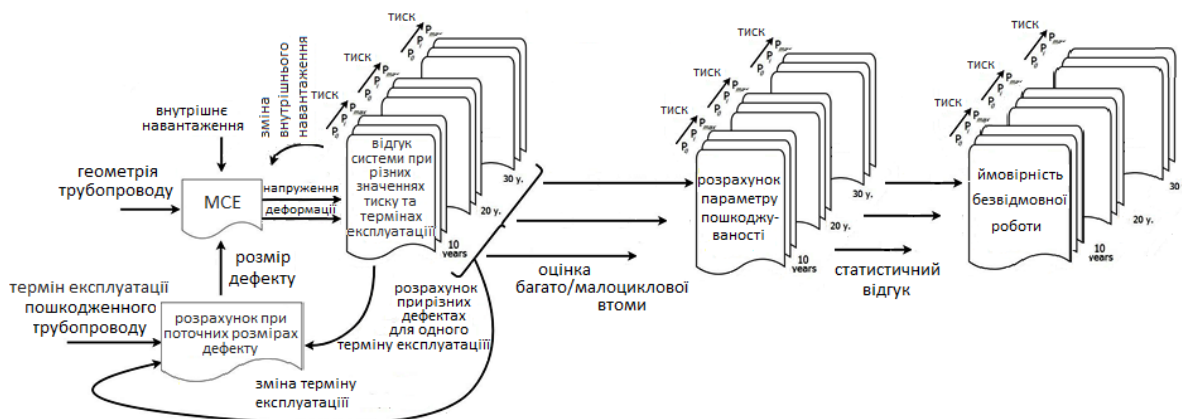


Рис. 1. Структурна схема прогнозування надійності трубопроводу з корозійним дефектом

1. На першому етапі створюється параметрична модель коліна трубопроводу з об'ємним дефектом, що дозволяє автоматично здійснити аналіз деформованого стану конструкції з дефектами різного розміру. Розміри дефекту (глибина, довжина і вага) моделюються з урахуванням відомих статистичних даних можливого розміру пошкодження для такого віку та середовища.

2. На другому етапі, на основі розробленої моделі, було проведено серію розрахунків для різних рівнів навантаження. Для цього було здійснено статичне моделювання трубопроводу з відповідними розмірами дефекту та навантаженням, що змінюється лінійно.

3. Крок 2 повторюється принаймні 150 разів з утворенням різних розмірів дефектів, які ймовірно можуть з'явитися при експлуатації трубопроводу відповідно до аналізованого віку.

4. На наступному етапі збільшується вік дефекту та створюються нові набори трубопроводу з дефектами різного розміру та аналізується їх деформований стан.

5. Дані, які накопичені на етапах 2–4 дають нам статистику концентрації напружень у трубопроводі з корозійним дефектом, що має певний відомий вік зростання.

6. Далі, з використанням оброблених статистичних даних та розробленої математичної моделі для оцінки накопичення втомних пошкоджень проводиться розрахунок параметру пошкоженості для трубопроводу з дефектом різного рівня розвитку та при різних рівнях внутрішнього навантаження.

7. На основі результатів етапу 6 проводиться оцінка надійності трубопроводу з дефектом при різних рівнях внутрішнього навантаження та може бути отримана ймовірність безвідмовної роботи.

#### Побудова розрахункової моделі. Моделювання трубопроводу

В роботі моделюється фрагмент коліна трубопроводу з урахуванням його криволінійної геометрії, нелінійними властивостями матеріалу та навантаженням, які відповідають стандарту ASME B31G. Модель складається з тороїдальної і циліндричної частин. Для розрахунку було обрано наступні значення розмірів конструкції: зовнішній радіус трубопроводу  $D = 508$  мм; товщина стінки  $h = 12,5$  мм; довжина досліджуваної частини трубопроводу  $l = 1,5$  м (відповідно до X42 типу трубопроводу). Довжину прямої частини секції труби вибирали апостеріорно після низки попередніх випробувань, коли крайові ефекти в моделі не впливають на деформований стан в досліджуваному перерізі труби. Матеріалом є сталь, властивості якої наведено в таблиці 1.

Ділянку трубопроводу навантажено внутрішнім тиском  $P$  і зафіксовано по краях. Для такого типу трубопроводів номінальний (робочий) тиск дорівнює 3 МПа. Також треба зазначити, що при експлуатації з певною частотою буває включення та виключення подачі речовини у трубопровід. При цьому значення внутрішнього тиску може бути більше робочого. Рівень максимального навантаження залежить від області розташування трубопроводу та відповідно до ASME B31.8 (2003) може змінюватися від 6 МПа до 12,8 МПа

(табл. 2), де LC1–LC4 – характерні місця розташування ділянки, що досліджується. Ці зони розподілені таким чином, що LC1 – це зона найвіддаленіша від населених пунктів, і в залежності від наближення до цих населених пунктів максимальне навантаження зменшується. У таблиці 2 LC1-LC4 означають зону розташування (local area) трубопроводу.

Таблиця 1

**Властивості матеріалу трубопроводу**

Параметр	Модуль пружності	Коефіцієнт Пуассона	Границя плинності	Границя міцності
Позначення	$E$ , ГПа	$\nu$	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа
Значення	205	0.3	290	430

Таблиця 2

**Зміна внутрішнього тиску**

Область розташування	Типове значення	LLC1	LLC2	LLC3	LLC4
Максимальний тиск, МПа	6	112.8	110.6	88.6	77.1

**Моделювання поверхневого дефекту.**

Об'ємний поверхневий дефект моделюється в центрі зовнішньої поверхні ділянки коліна трубопроводу (рис. 2). Для дослідження було обрано дефект у формі паралелепіпеду із закругленими границями. Оскільки дефект розташований на поверхні вигину труби, ескіз був спроектований в локальній тороїдальній системі координат, яка залежить від радіусу коліна трубопроводу  $R$ . Геометричні параметри, такі як довжина ( $d_1$ ), ширина ( $d_2$ ) та глибина ( $d_3=h-d$ ), задано параметрично. Це дозволяє автоматично перебудовувати модель залежно від розмірів.

Конкретні розміри дефекту визначаються з аналізу поточного стану його розвитку. Тому в роботі пропонується отримувати розрахункові моделі з дефектом певного рівня розвитку та вивчати залишкову міцність трубопроводу у певний час його експлуатації. З аналізу відомих досліджень можна підсумувати, що зазвичай при оцінці росту дефектів використовують лінійні [8] або нелінійні [8, 9] моделі для кінетики росту корозії.

В даній роботі пропонується враховувати ріст дефекту у часі у вигляді степеневої функції, яка пов'язує час експлуатації та характерний розмір  $d_j(t)$  [9]

$$d_j(t) = k(t - t_0)^\alpha, \tag{1}$$

де  $t_0$  – час появи корозійного пошкодження,  $\alpha$  та  $k$  – це показники кінетики росту пошкоджуваності. З літературних даних та практики експлуатації трубопроводів відомо, що типово за 5 років на поверхні трубопроводу виникають пошкодження корозійного типу. Тому при розрахунках було обрано  $t_0 = 5$  років. Процес розвитку корозії є випадковим, що може бути враховано, якщо показники рівняння кінетики її росту (1):  $\alpha$  та  $k$  вважати випадковими величинами. Такий підхід широко використовується в літературі. При цьому відомо багато статистичних даних щодо можливих значень параметрів  $\alpha$  та  $k$  і їх можливої варіації, зокрема і залежно від зовнішніх чинників, а також різних напрямків росту корозійного пошкодження (тобто у глибину та по поверхні у ширину і довжину).

Параметр  $k$  здатен суттєво змінюватись, навіть за більш-менш однакових зовнішніх факторах. Параметр  $\alpha$  в деяких дослідженнях вважається сталою детермінованою величиною, але є робота, що аналізує його зі статистичної точки зору. Проте його можлива варіація є не суттєвою, тому в даній роботі пропонується вважати параметр  $\alpha$  фіксованим та таким, що дорівнює 0,73.

Із статистичних даних відомо, також що розподіл значень розмірів дефекту із достатньою точністю можна вважати підпорядкованим підпорядковується логнормальному закону розподілення

$$f(d_j, t) = \frac{1}{d_j \sigma_j(t) \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\ln d_j - \mu_j(t))^2}{2\sigma_j^2(t)} \right], \tag{2}$$

де  $\sigma_j(t)$  та  $\mu_j(t)$  – це параметри закону, які залежать відповідно до розміру дефекту у поточний час експлуатації та визначаються через співвідношення (1) з коефіцієнту варіації та математичного очікування габаритних розмірів дефекту наступним чином:

$$\mu_j(t) = \ln \left[ \frac{m_j(t)}{\sqrt{1 + \frac{v_j}{m_j^2(t)}}} \right], \quad \sigma_j^2(t) = \ln \left( 1 + \frac{v_j}{m_j^2(t)} \right), \tag{3}$$

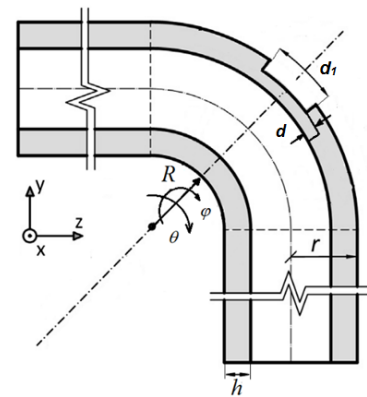


Рис. 2. Ескіз розрахункової моделі

$$m_j(t) = \langle d_j(t) \rangle = \langle k_j \rangle (t - t_0)^\alpha, \quad \sigma_{d_j}^2(t) = \langle d_j(t)^2 \rangle = \sigma_{k_j}^2 (t - t_0)^{2\alpha}, \quad v_j = \frac{\sigma_{d_j}(t)}{m_j(t)} = \frac{\sigma_{k_j}}{k_j} = \text{const}, \quad (4)$$

де  $\langle \dots \rangle$  – оператор усереднення,  $m_j(t)$  – математичне очікування,  $v_j$  – коефіцієнт варіації, який залежить від часу. На рисунку 2 на схематично зображено розвиток у часі середньої глибини корозійного пошкодження  $m_3(t)$  та можливий розкид її значень у часі.

Таблиця 3

**Ймовірнісні характеристики габаритних розмірів дефекту**

Параметр	Коефіцієнт варіації	Середнє квадратичне відхилення, мм
Довжина	5,2	20
Ширина	2,9	11
Глибина	0,075	0,5

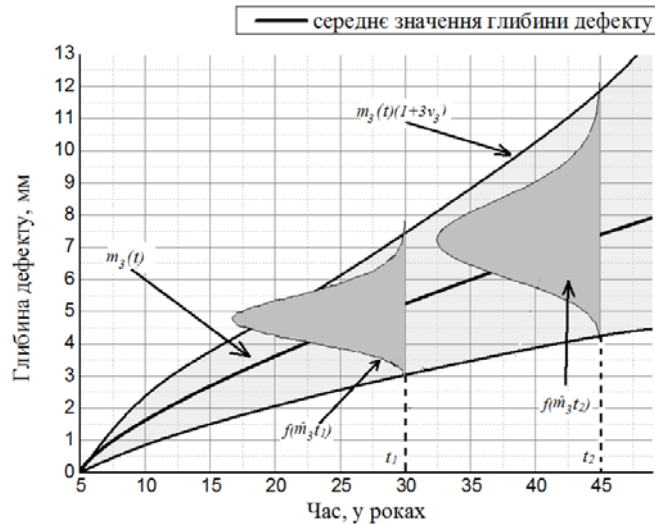


Рис. 3. Графік можливої зміни глибини дефекту у часі та у поточний рік експлуатації

**Скінчено-елементна модель**

Для визначення НДС криволінійної частини трубопроводу використовували МСЕ. При розрахунках було використано чверть моделі, в якій враховано симетрію трубопроводу.

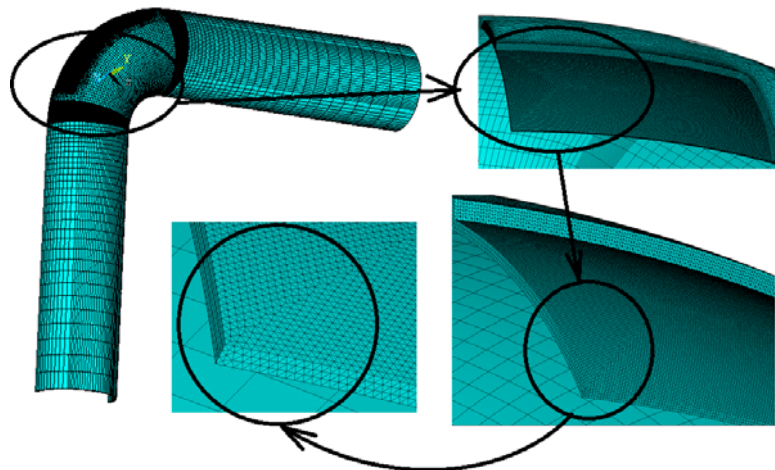


Рис. 4. Сітка чверті коліна трубопроводу

**Оцінка НДС конструкції**

При створенні сітки враховували особливості моделі. Розмір елемента поступово зменшується при наближенні до зони з пошкодженням. Задано чотири елементи за товщиною. На непошкоджених ділянках трубопроводу будували впорядковану гексагональну сітку, у зоні дефекту – тетраедральну. Використовували ізо-параметричний скінчений елемент з 8-а вузлами та зі 3-а ступенями вільності у вузлі. Сітку усєї моделі та детально поверхневий дефект зображено на рис. 4.

Попередньо було проведено серію розрахунків коліна трубопроводу з середніми розмірами дефекту відповідно до геометричних параметрів, що відповідали різному часу життя пошкодженого трубопроводу

(період від 10 до 45 років). Виявлено, що пластичні деформації у першу чергу з'являються у повздовжньому напрямку пошкодження. Також треба зазначити, що при експлуатації конструкції з фіксованими розмірами дефекту, що до 23 років пластичні деформації починають з'являтися у протилежному напрямку відносно дефекту, тобто у місці найбільшої кривизни. Більш того ці деформації з'являються за великих значень внутрішнього тиску, які не відповідають умовам експлуатації. Таким чином можна зробити висновок, що поверхневий дефект з середніми габаритними розмірами протягом перших 23 років не впливає суттєво на НДС конструкції. На рис. 5 показано при якому навантаженні в конструкції з середніми розмірами дефекту еквівалентні напруження досягають границі плинності та міцності.

На рис. 5 лінією з прямокутними маркерами відображено зміну значення внутрішнього тиску, при якому в конструкції виникають пластичні деформації у відповідний період експлуатації трубопроводу з об'ємним дефектом середніх розмірів. Прямими лініями вказано значення максимального зовнішнього навантаження в залежності від області розташування трубопроводу.

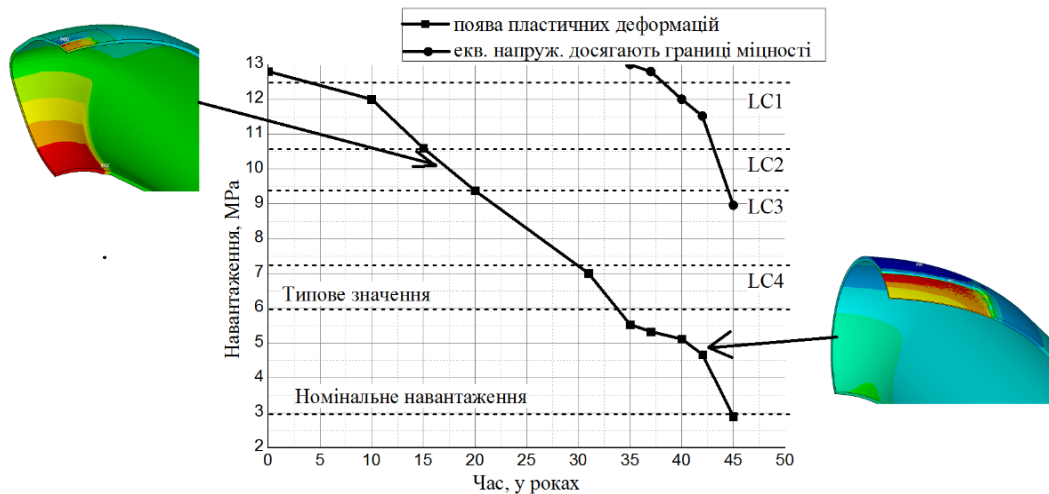


Рис. 5. Значення внутрішнього тиску, що призводить до появи пластичних деформацій в конструкції та досягання границі міцності при середніх розмірах об'ємного дефекту

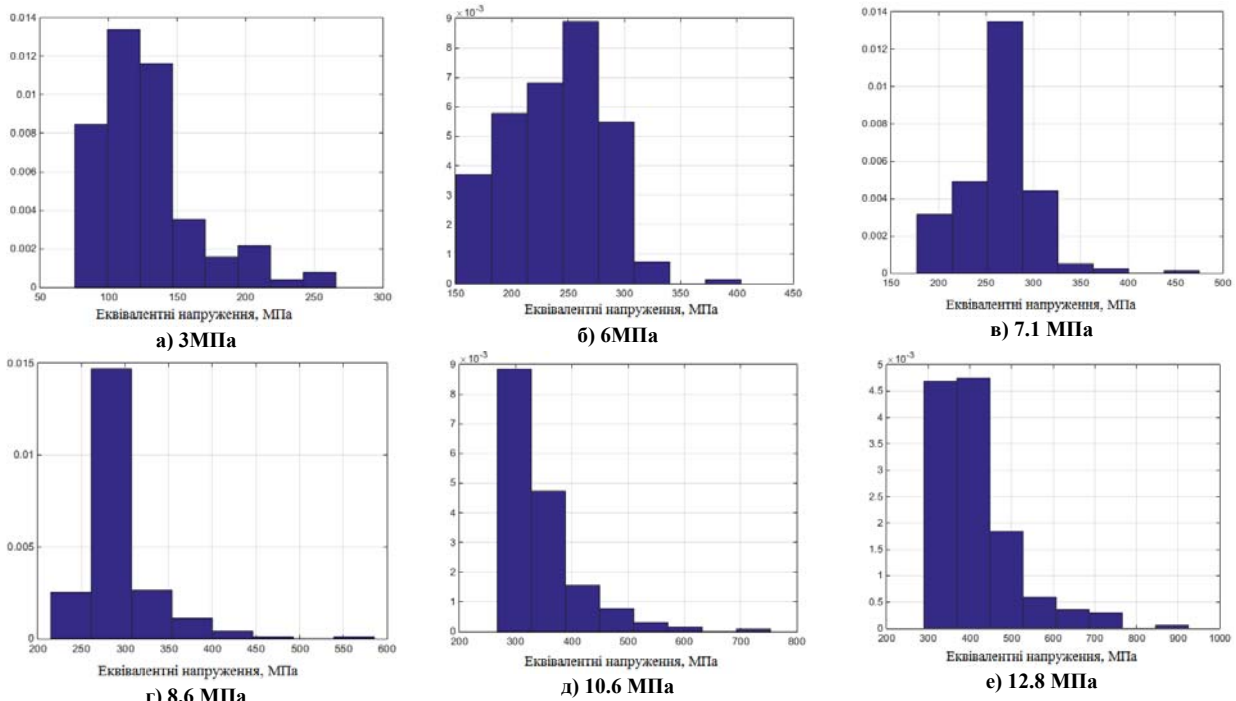


Рис. 6. Гістограми розподілу максимальних еквівалентних напружень в конструкції з пошкодженням з терміном експлуатації 45 років за різних рівнів навантаження



Виявлено, що у період після 35 років експлуатації у трубопроводі можуть з'являтися пластичні деформації при типовому навантаженні (рис. 4 лінія з прямокутними маркерами). В період експлуатації від 37 років у трубопроводі з відповідним дефектом при дії максимально можливого навантаження виникають напруження, які привішують границю міцності (рис. 4, лінія з круглими маркерами).

Тому подальші дослідження пошкодженого трубопроводу проводилось для періоду експлуатації з 35 до 45 років. Для кожного моменту часу (від 35 до 45 років) було проведено біля 200 розрахунків з випадковими розмірами дефекту, які підпорядковуються логнормальному закону розподілення та мають відповідні відомі ймовірнісні характеристики (3-4).

Для аналізу результатів було обрано 5 вузлів (K,L,H,G,F на рис.6) на конструкції в зоні з дефектом, що знаходяться в типових місцях появи пластичних деформацій, які були виявлені при попередніх дослідженнях.

Після проведених розрахунків отримані ймовірнісні характеристики НДС конструкції при різних рівнях навантаження та у різний термін експлуатації. Отримані дані за еквівалентними напруженнями за критерієм Мізеса, які було статистично оброблено. Сформовані гістограми для різних рівнів навантаження та визначені середні значення, дисперсії та коефіцієнти асиметрії гістограм.

На рис. показано схематичне визначення ймовірності безвідмовної роботи за допомогою отриманих результатів для параметру пошкоджуваності (35).

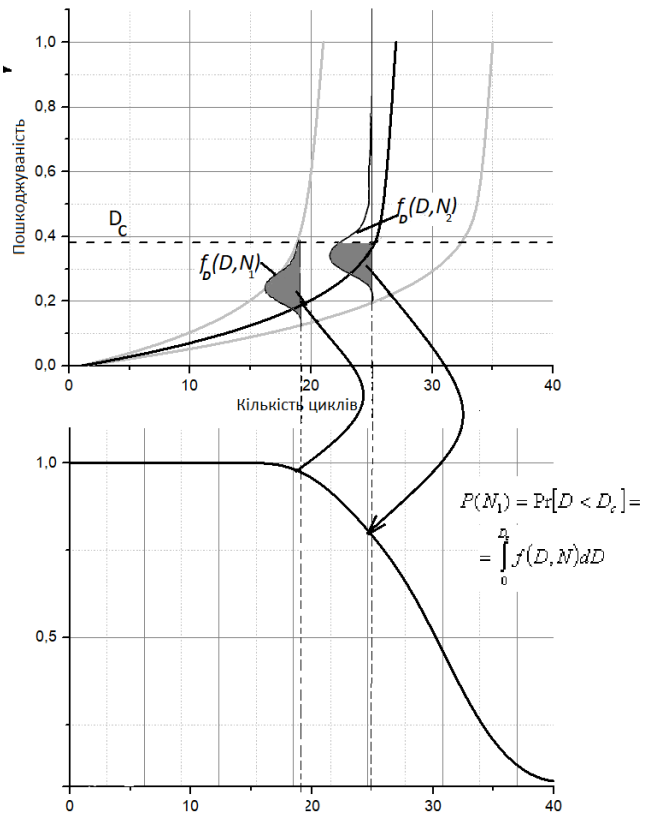


Рис. 7. Визначення ймовірності безвідмовної роботи

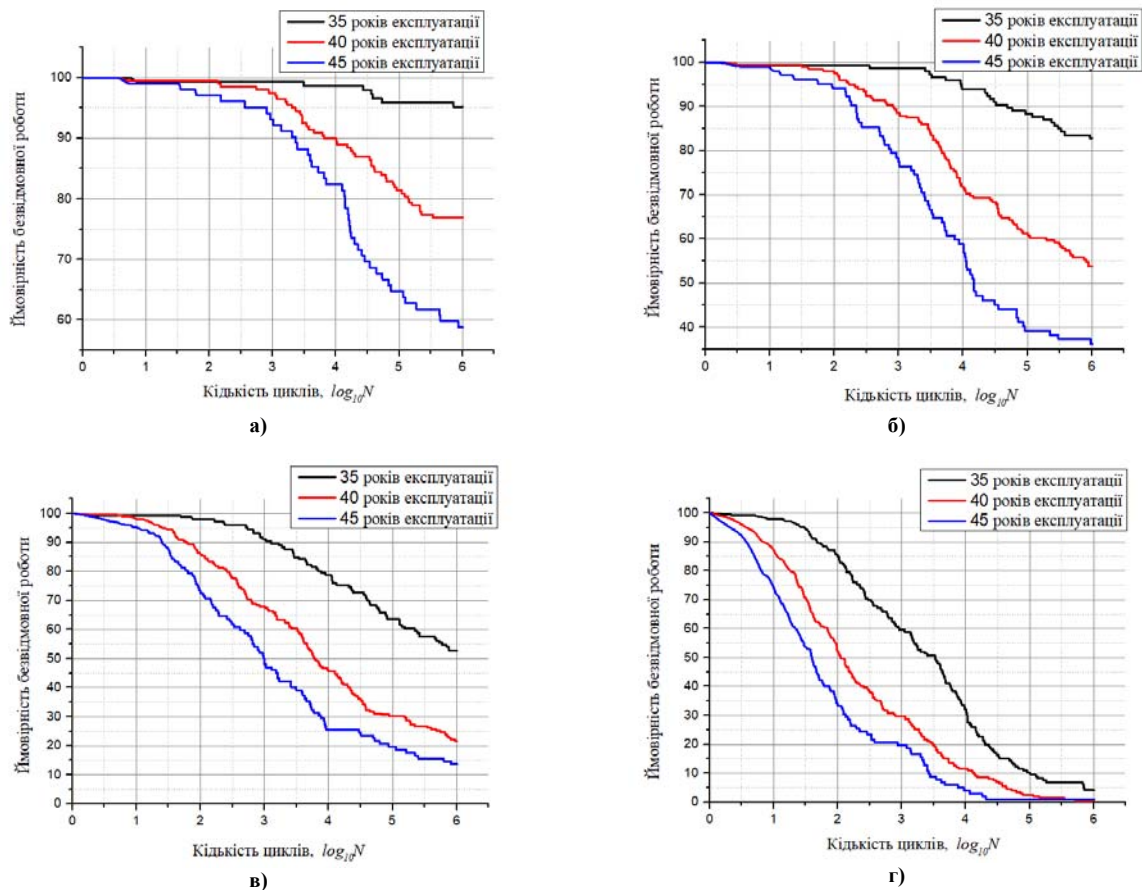


Рис. 8. Ймовірність безвідмовної роботи при навантаженні відповідно до зон розміщення трубопроводу а) вкл/викл, б)-д) зони LC4-LC1 відповідно

Отримано чисельні ймовірності безвідмовної роботи коліна трубопроводу в залежності від величини пульсації тиску при режимах пуску та зупинки експлуатації. Розглянуто такі рівні навантаження: типове, що дорівнює 6 МПа (рис. 2 а) та максимально можливе залежно від місця розташування конструкції LC4-7.1 МПа, LC3-8.6 МПа, LC2-10.6 МПа, LC1-12,8 МПа (рис. 2 б-д).

З отриманих результатів видно, що при навантаженні 6 МПа (рис. 8а), ймовірність безвідмовної роботи після 500 циклів дорівнює 96 %. При максимально можливих рівнях навантаження відповідно від зони розміщення трубопроводу ймовірність безвідмовної роботи менше 100%, починаючи з 100 циклів роботи. З даних результатів можна зробити висновок, що експлуатація трубопроводу з дефектом з відповідними розмірами може бути небезпечною, т.я. ймовірність відмови досить велика.

Вдячність: Дана робота виконана за підтримки МОН України в рамках реалізації науково-дослідної роботи "Розробка методів математичного моделювання поведінки нових та композиційних матеріалів для оцінки ресурсу та прогнозування надійності елементів конструкцій" (№ ДР 0117U004969).

### Висновки

В роботі проведено серію розрахунків криволінійної частини трубопроводу з пошкодженням, що стохастично розвивається при різних термінах експлуатації. На основі отриманих результатів було визначено статистичні характеристики НДС залежно від внутрішнього тиску та часу, який перебуває в експлуатації трубопроводу. На основі отриманих даних та розробленої математичної моделі для оцінки накопичення втомних пошкоджень визначено параметр пошкоджуваності для трубопроводу з дефектом. З використання отриманих значень ймовірність безвідмовної роботи коліна трубопроводу залежно від величини пульсації тиску при режимах пуску та зупинки експлуатації. Визначено, що при експлуатації коліна трубопроводу з пошкодженням, яке розвинулось за час експлуатації від 35 до 45 років при максимально можливому навантаженні у всіх відповідних зонах існує ймовірність відмови.

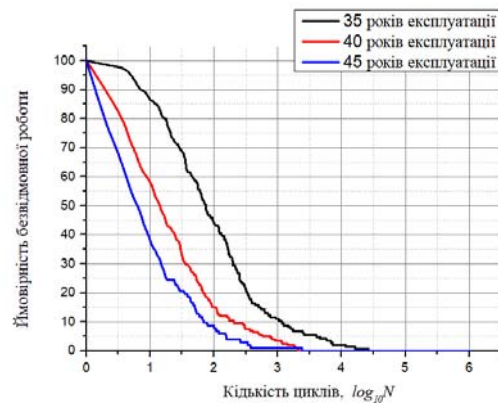
### Література

1. Cunha D.J.S. et al. Fatigue analysis of corroded pipelines subjected to pressure and temperature loadings // *Int. J. Press. Vessel. Pip.* Elsevier Ltd. – 2014. – Vol. 113. – P. 15–24.
2. Mansor N.I.I. et al. A review of the fatigue failure mechanism of metallic materials under a corroded environment // *Eng. Fail. Anal.* Elsevier Ltd. – 2014. – Vol. 42. – P. 353–365.
3. Jaoude A.A. et al. Lifetime analytic prognostic for petrochemical pipes subject to fatigue // *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*. IFAC. – 2012. – Vol. 8, № PART 1. – P. 707-713.
4. Poberezhnyi L. et al. Fatigue and failure of steel of offshore gas pipeline after the laying operation // *Arch. Civ. Mech. Eng. Politechnika Wroclawska.* – 2016. – Vol. 16, № 3. – P. 524–536.
5. Fatoba O., Akid R. Low cycle fatigue behaviour of API 5L X65 pipeline steel at room temperature // *Procedia Eng.* Elsevier B.V. – 2014. – Vol. 74. – P. 279–286.
6. Papadopoulos G.A., Davidov Y.A., Vodenicharov S.B. Low-cycle fatigue loading of BDS 25G pipeline steel // *Theor. Appl. Fract. Mech.* – 1998. – Vol. 30, № 2. – P. 133–137.
7. Pinheiro B. de C., Pasqualino I.P. Fatigue analysis of damaged steel pipelines under cyclic internal pressure // *Int. J. Fatigue.* Elsevier Ltd. – 2009. – Vol. 31, № 5. – P. 962–973.
8. Takahashi K. et al. Experimental study of low-cycle fatigue of pipe elbows with local wall thinning and life estimation using finite element analysis // *Int. J. Press. Vessel. Pip.* Elsevier Ltd. – 2010. – Vol. 87, № 5. – P. 211–219.
9. Takahashi K. et al. Low cycle fatigue behaviors of elbow pipe with local wall thinning // *Nucl. Eng. Des.* – 2009. – Vol. 239, № 12. – P. 2719–2727.
10. Lemaitre J. A course on damage mechanics / J. Lemaitre. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1996.

Рецензія/Peer review : 7.12.2018 р.

Надрукована/Printed : 15.2.2019 р.

Рецензент: д.т.н., проф.. Бреславський Д.В.



д)

Рис. 8. Ймовірність безвідмовної роботи при навантаженні відповідно до зон розміщення трубопроводу а) вкл/викл. б)-д) зони LC4-LC1 відповідно (продовження)