

Прогнозування часу до відмови трубопроводів з урахуванням корозії, дефектів і тиску

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.100>

Назар Приходько

Кафедра математичного моделювання та
інтелектуальних обчислень в інженерії

НТУ «ХПІ»

Харків, Україна

Nazar.Prykhodko@infiz.khpi.edu.ua

Олександр Трубаєв

Кафедра математичного моделювання та
інтелектуальних обчислень в інженерії

НТУ «ХПІ»

Харків, Україна

trubayev@gmail.com

Анотація—Розроблено математичну модель для прогнозування часу до відмови трубопроводів, що враховує процеси корозії, дефекти труби та тиск. Моделювання часу до відмови здійснюється за допомогою методу Монте-Карло, що дозволяє враховувати варіації параметрів корозії, дефектів та тиску.

Ключові слова—корозія, дефекти, тиск, трубопроводи, метод Монте-Карло, прогнозування часу до відмови.

I. ВСТУП

Трубопроводи є невід'ємною частиною інфраструктури для транспортування рідин та газів на великі відстані. Однак, внаслідок тривалої експлуатації та впливу різноманітних факторів, таких як корозія, механічні дефекти та тиск, термін служби трубопроводів може значно знижуватись. Моделювання часу до відмови трубопроводів є критично важливим для своєчасного технічного обслуговування та забезпечення надійності системи [1,2]. У цьому контексті ми пропонуємо математичну модель, що враховує корозійні процеси, дефекти труби та вплив тиску на час до відмови.

Мета цієї роботи полягає в розробці математичної моделі для прогнозування часу до відмови трубопроводів з урахуванням корозії, дефектів та тиску. Для досягнення поставленої мети були визначені наступні задачі:

- Оцінка впливу корозії, дефектів та тиску на довговічність труби.
- Моделювання часу до відмови за допомогою методу Монте-Карло.
- Статистичний аналіз отриманих результатів і побудова гістограми часу до відмови.

II. ОПИС МОДЕЛІ

Модель базується на кількох ключових факторах, що визначають час до відмови труби:

A. Швидкість корозії

Для різних зон труби швидкість корозії може бути різною:

- Для звичайної зони труби (базової зони) швидкість корозії складає 0.05 мм/рік, для зварних швів — 0.6 мм/рік.
- Для напрямку вздовж труби швидкість корозії становить 0.1 мм/рік, а для перпендикулярного напрямку — 0.05 мм/рік.
- Швидкість корозії підлягає варіаціям з відхиленням 0.01 мм/рік.

B. Дефекти

Дефекти на трубі, такі як вм'ятини, можуть значно прискорювати процес корозії. Тому для кожної симуляції генерується випадковий дефект, що має:

- Глибину h від 0.1 до 2 мм.
- Розмір дефекту $size$ від 1 до 5 мм.

Чим більша глибина дефекту, тим швидше відбувається корозія. Швидкість корозії коригується за допомогою коефіцієнта, що залежить від глибини дефекту:

$$K = k \cdot (1 + 0.1 \cdot h / l_{\text{мм}}) \quad (1)$$

де K коригована корозія, k некорегована корозія, h глибина дефекту в мм.

C. Вплив тиску

Тиск у трубопроводі також є важливим чинником, що впливає на корозію [3]. Чим більший тиск, тим більшою є швидкість корозії. Математично це описується так:

$$K' = k \cdot (1 + 0.01 \cdot P / P_{\text{ном}}) \quad (2)$$

де P — тиск в МПа, $P_{ном}$ — номінальний тиск $P_{ном} = 1$ МПа, K' — корозія з урахуванням тиску.

D. Час до відмови

Час до відмови труби T обчислюється через відношення початкової товщини труби до коригованої швидкості корозії:

$$T = S / K'' \quad (3)$$

де S — початкова товщина труби, а K'' коригована швидкість корозії враховує дефекти та вплив тиску.

E. Метод Монте-Карло

Для оцінки середнього часу до відмови та варіацій в нашій моделі ми використовуємо метод Монте-Карло. Це метод статистичного моделювання, який використовує випадкові величини для обчислення чисельних результатів [4,5]. У нашому випадку:

1. Кількість симуляцій: 1000.
2. Випадкова вибірка:
 - Випадковим чином вибираються зони корозії (базова зона або зварний шов).
 - Випадковим чином вибирається напрямок корозії (вздовж труби або перпендикулярно).
 - Для кожної симуляції генерується випадковий дефект з випадковою глибиною та розміром.
 - Розраховується час до відмови для кожної симуляції.

F. Прогнозування часу до відмови

Після виконання симуляцій проводиться статистичний аналіз результатів. Середній час до відмови μ розраховується як:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (4)$$

де N кількість симуляцій T_i час відмови для i -тої симуляції.

Варіація σ розраховується як:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - \mu)^2} \quad (5)$$

III. РЕЗУЛЬТАТИ

Після виконання симуляцій ми отримали статистичні характеристики для часу до відмови труби:

- Середній час до відмови труби в моделі становить 64.91 років.

- Стандартне відхилення часу до відмови — 30.16 років.

Це означає, що час до відмови в розглянутому випадку може варіюватися в межах 34.75 років до 95.07 років, в залежності від варіацій корозії, дефектів та тиску.

IV. ВИСНОВКИ

Модель дозволяє ефективно прогнозувати час до відмови трубопроводів, враховуючи ключові фактори, такі як корозія, дефекти та тиск. Середній час до відмови труби залежить від варіацій корозії, дефектів і тиску, і варіюється в широких межах. Отримані результати можуть бути використані для планування технічного обслуговування трубопроводів та для підвищення їхньої надійності.

Модель, яка була розроблена в цій роботі, є основою для подальших вдосконалень і може бути доповнена додатковими чинниками для досягнення більш точних та комплексних прогнозів. Це дозволить врахувати більшу кількість параметрів, що можуть впливати на час до відмови трубопроводів:

1. Вплив температури та хімічного складу середовища: Ці фактори можуть значно впливати на процеси корозії. Наприклад, підвищена температура прискорює корозію, а агресивні хімічні речовини можуть прискорювати її ще більше. Для більш точної моделі слід врахувати ці фактори, що дозволить робити прогнози для трубопроводів, що працюють в різних умовах.
2. Врахування напружено-деформованого стану: Механічні навантаження, такі як коливання тиску або зовнішні удари, можуть також мати великий вплив на знос труб. Тому модель можна вдосконалити, враховуючи вплив таких навантажень на напружено-деформований стан труби, що дозволить отримати більш точні прогнози щодо терміну служби, особливо для трубопроводів, що експлуатуються в умовах високих напружень і деформацій.
3. Розширення моделі на інші типи дефектів і пошкоджень: Додаткове вдосконалення моделі передбачає розширення її можливостей для включення різних типів дефектів труб, таких як тріщини, ерозія та інші фізичні пошкодження. Це дозволить точніше моделювати реальні умови експлуатації трубопроводів, де дефекти можуть виникати не тільки через корозію, а й через механічні пошкодження чи інші фактори.

Завдяки цим вдосконаленням модель стане більш універсальною та здатною враховувати широкий спектр умов експлуатації трубопроводів, що зробить її важливим інструментом для планування надійності та довговічності трубних систем.

References

- [1] Carneiro J. O., Melo F., Rodrigues J., Lopes H., Teixeira V. The modal analysis of a pipe elbow with realistic boundary conditions // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2005. Vol. 82. P. 593–601.
- [2] Zhang B., Xing Z.-Y., Wang T., Wang Z. The vibration characteristics and allowable span length of free span submarine pipeline // *Proceedings of the 4th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering (MME-16)*. 2017. P. 118–123.
- [3] Петрина, Д. Ю. Вплив корозійного середовища на сучасні сталі магістральних трубопроводів / Д. Ю. Петрина, Л. Г. Петрина // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. - 2022. - № 2. - С. 95-104.
- [4] Zhou Y., Wang J. Time-varying reliability analysis of corroded gas pipelines using Monte Carlo simulation // *Engineering Structures*. – 2024. – Vol. 289. – Article ID 115982.
- [5] Seghier M.E.A.B., et al. Comparative study on the efficiency of simulation and meta-model-based Monte Carlo techniques for accurate reliability analysis of corroded pipelines // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14, No. 10. – Article ID 5830.