

Розрахунок надійності сталевих підземних трубопроводів

С. Ф. Пічугін, А. В. Махінько

Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка, Полтава, Україна

Викладено основні принципи розрахунку сталевих підземних трубопроводів, які розташовані на стохастичній пружній основі, на надійність за критеріями міцності та жорсткості у техніці абсолютних максимумів випадкових функцій. Наведено конкретні числові приклади, що ілюструють загальну методичку розрахунку.

Ключові слова: підземний трубопровід, надійність трубопроводу, стохастична пружна основа, випадкова функція зусилля.

Вступ. У комплексі споруд, що входять до складу підприємств машинобудівної, металургійної, вугільної, нафтової, хімічної та інших галузей промисловості, гідро- і теплоелектростанцій, систем меліорації, сільського господарства та міських господарств, виділимо підземні трубопроводи різного призначення. Вони використовуються в водонапірних, каналізаційних, нафтопровідних, теплофікаційних, водопропускних та інших системах. Розрахунок трубопроводу зазвичай виконують за припущення, що його властивості та властивості основи, на яку він спирається, є детерміністичними. Однак це твердження не завжди є справедливим. По-перше, властивості ґрунтової основи залежать від багатьох чинників, що не піддаються безпосередньому обліку, і тому мають випадковий характер. По-друге, коефіцієнти жорсткості та міцності основи можуть змінюватись випадково як при переході від однієї точки основи до іншої, так і при переході від однієї конструкції до іншої. По-третє, зовнішні навантаження, властивості матеріалу та геометричні розміри трубопроводів залежать від великої кількості різноманітних, слабкоконтрольованих та складновзаємодіючих причин, що також мають мінливий, випадковий характер. З урахуванням викладеного в сучасних умовах будівництва актуальним є впровадження в практику розрахунку підземних трубопроводів імовірнісних методів.

Напруження і деформації сталевих підземних трубопроводів, які прокладаються у статистично неоднорідному ґрунті, є випадковими функціями осьової координати. Цей факт повинен обов'язково враховуватись при розрахунку трубопроводів на міцність і жорсткість та при призначенні його основних характеристик таким чином, щоб імовірність досягнення першого і другого граничного станів була достатньо малою.

Вперше імовірнісним підходом до розрахунку міцності підземних трубопроводів скористався В. В. Болотін, виклавши його у роботах [1, 2]. Однак у цих, безумовно, фундаментальних роботах більше уваги приділялось розв'язанню диференційного рівняння зігнутої осі трубопроводу з випадковими параметрами, ніж безпосередньо оцінці надійності самого трубопроводу. Окрім того, внаслідок складності і специфічності математичного апарату, що вико-

ристовувався, отримані результати були недоступні пересічному інженеру-проектувальнику. З огляду на це у даній роботі з урахуванням ідей та результатів, отриманих В. В. Болотіним, представлено методику саме розрахунку надійності сталевих підземних трубопроводів, в основу якої покладено ідею раціонального компромісу між точністю та простотою проведення імовірнісних розрахунків.

Постановка задачі. Як і у роботах [1, 2], будемо розглядати сталевий трубопровід зовнішнім діаметром D , товщиною стінки δ , який прокладено в статистично неоднорідному ґрунті. Згинальну жорсткість трубопроводу позначимо через EI , жорсткість трубопроводу при стиску чи розтязі – EA , ефективну ширину – b_{eff} , коефіцієнт жорсткості основи – $c = \tilde{c}(x)$. Координатну систему $0xy$ виберемо так, як показано на рис. 1. Згідно з [1, 2], припустимо, що основа, яка підготовлена для укладання трубопроводу, є нерівною. Рівняння кривої, що описує цю початкову нерівність, буде $u = \tilde{u}(x)$ – рис. 1,а.

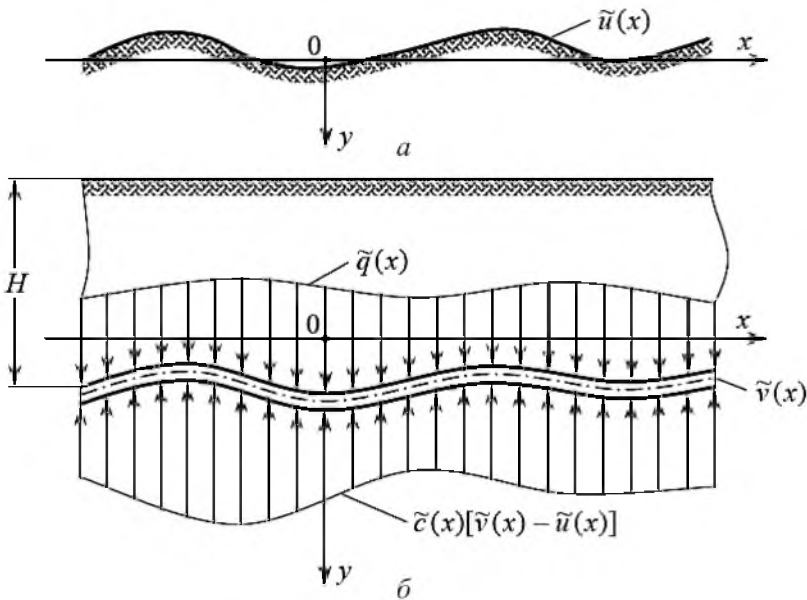


Рис. 1. Розрахункова схема трубопроводу на суцільній пружній основі з випадковими характеристиками.

Окрім того, допускаємо, що вісь трубопроводу має початкові невеликі викривлення у площині $0xy$. Ці викривлення характеризуються функцією $w = \tilde{w}(x)$, яка вибрана таким чином, щоб її середнє значення на достатньо великій довжині було тотожне нулю. Інтенсивність зовнішніх сил, що діють на трубопровід, позначимо через $\tilde{q}(x)$. При цьому, на відміну від робіт [1, 2], в яких урахувалось тільки навантаження від вищерозташованих шарів ґрунту $\tilde{q}_1(x)$, будемо враховувати навантаження від власної ваги трубопроводу \tilde{q}_2 , гідростатичний тиск рідини, що цілком заповнює трубопровід без напору \tilde{q}_3 , та температурне навантаження \tilde{q}_4 :

$$\tilde{q}(x) = \tilde{q}_1(x) + \tilde{q}_2 + \tilde{q}_3 + \tilde{q}_4. \quad (1)$$

Для диференційного рівняння пружної осі трубопроводу маємо (з урахуванням осьової сили N) [1]:

$$EI \frac{d^4 v}{dx^4} + N \frac{d^2 v}{dx^2} + cv = \tilde{q}(x) + \tilde{c}(x)\tilde{u}(x) + EI \frac{d^4 w}{dx^4}. \quad (2)$$

При розв'язанні даного диференційного рівняння в [1, 2] введено наступне припущення, яке неодноразово підтверджується експериментально: функція початкових викривлень $w = \tilde{w}(x)$, функція нерівностей $u = \tilde{u}(x)$, зовнішнє навантаження $\tilde{q}(x)$ та коефіцієнт жорсткості основи $c = \tilde{c}(x)$ є стаціонарними ергодичними однорідними випадковими функціями координати x . Середні значення навантаження та коефіцієнта жорсткості ґрунту основи позначимо відповідно через \bar{q} та \bar{c} . Середнє значення функції $\tilde{u}(x)$ приймається рівним нулю. Отримавши таким чином за цих припущень разом з умовами обмеженості на нескінченності стохастичну крайову задачу відносно функції $\tilde{v}(x)$ та ввівши функцію неоднорідності ґрунтових умов $\tilde{r}(x)$, в [1, 2] отримано формулу для спектральної щільності $S_r(\cdot)$ функції $\tilde{r}(x)$:

$$S_r(\omega) = \frac{\alpha\beta_0^2\bar{q}^2}{\pi} \left[\frac{1}{(\omega - \theta)^2 + \alpha^2} + \frac{1}{(\omega + \theta)^2 + \alpha^2} \right], \quad (3)$$

де α та θ – параметри спектральної щільності $S_r(\omega)$ розмірністю m^{-1} , які залежать від типу ґрунту основи; β_0 – коефіцієнт неоднорідності, що характеризує розкид сумарного навантаження на трубопровід, тобто суми тиску верхніх шарів і реакції ґрунту.

Вираз (3) є основним результатом указаних робіт із розрахунку трубопроводу на пружній основі зі стохастичними характеристиками. Він підтверджений експериментально, а тому використовується надалі для оцінки надійності сталевих підземних трубопроводів.

Розрахунок надійності трубопроводу за критерієм міцності. Нехай умова міцності зводиться до вимоги, щоб пружний згинальний момент $\tilde{M}(x)$, який є випадковою функцією координати x , у жодному перерізі трубопроводу довжиною L не перевищив за модулем гранично допустимого рівня M_{lim} . В імовірнісній постановці цій умові відповідає вимога достатньо малої імовірності події, яка полягає у тому, що на інтервалі $0 \leq x \leq L$ граничний рівень $\pm M_{lim}$ буде перевищений за модулем хоча б один раз (рис. 2), тобто: $-M_{lim} < \tilde{M}(x) < +M_{lim}$.

Функція надійності сталевого трубопроводу має наступний вигляд:

$$P(L) = 1 - Q(L) = P \left[\sup_{0 \leq x \leq L} |\tilde{M}(x)| < M_{lim} \right], \quad (4)$$

де $\sup |\tilde{M}(x)|$ – верхня межа значень функції $\tilde{M}(x)$ в інтервалі $0 \leq x \leq L$; $Q(L)$ – імовірність відмови сталевого трубопроводу на довжині L .

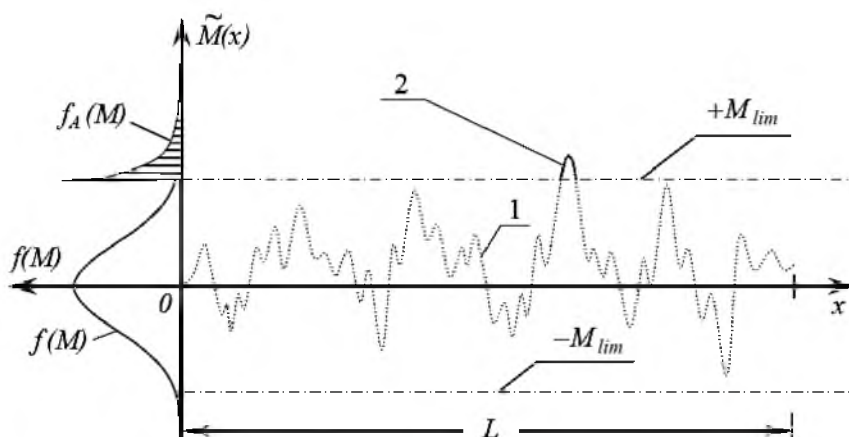


Рис. 2. Реалізація випадкової функції пружного згинального моменту: 1 – випадкова функція $\tilde{M}(x)$; 2 – абсолютні максимуми функції $\tilde{M}(x)$ ($f(M)$ – розподіл згинального моменту).

Припустимо, що ордината випадкової функції $\tilde{M}(x)$ розподілена за нормальним законом із нульовим математичним сподіванням та стандартом \hat{M} , який однозначно визначається через згинальну жорсткість балки EI та середній квадрат кривини осі балки $\bar{\chi}^2$:

$$\hat{M} = EI(\bar{\chi}^2)^{1/2}. \quad (5)$$

За допомогою співвідношення між кривою трубопроводу $\bar{\chi}^2$ та його спектральною щільністю $S_\chi(\omega)$ формулу (5) можна переписати наступним чином:

$$\hat{M} = EI \left[\int_0^\infty S_\chi(\omega) d\omega \right]^{1/2}. \quad (6)$$

Тут $S_\chi(\omega)$, в свою чергу, визначається за формулою

$$S_\chi(\omega) = \frac{S_r(\omega)\omega^4}{(EI\omega^4 + b_{eff}\bar{c})^2}, \quad (7)$$

де b_{eff} – ефективна ширина трубопроводу, м; \bar{c} – математичне сподівання коефіцієнта жорсткості основи, Н/см³; $S_r(\omega)$ – спектральна щільність функції неоднорідності деформацій сталевго підземного трубопроводу (див. вище).

Якщо несуча здатність трубопроводу має гаусовський розподіл, що у більшості випадків є виправданим, то у зв'язку з нормальним розподілом пружного згинального моменту резерв несучої здатності також буде розподілений за нормальним законом. Тоді імовірність відмови визначатиметься як [3, 4]

$$Q(L) = \exp[-0,5(\gamma_0^2 - \beta^2)], \quad (8)$$

де γ_0 – характеристичний максимум випадкової функції $\tilde{M}(x)$; β – характеристика безпеки.

Згідно з [3, 4] маємо

$$\gamma_0 = \sqrt{2 \ln \left[\frac{\omega_\chi L}{\pi \beta_\chi} \right]}, \quad (9)$$

де ω_χ – параметр розмірністю m^{-1} , аналогічний ефективній частоті випадкового процесу і характеризуючий мінливість кривини осі трубопроводу та згинального моменту за його довжиною; β_χ – коефіцієнт широкосмужності випадкової функції $\tilde{M}(x)$. Оцінити ці величини можна за наступними формулами [5, 6]:

$$\omega_\chi = \left[\frac{\int_0^\infty S_\chi(\omega) \omega^2 d\omega}{\int_0^\infty S_\chi(\omega) d\omega} \right]^{1/2}; \quad (10)$$

$$\beta_\chi = \left[\frac{\int_0^\infty S_\chi(\omega) \omega^4 d\omega}{\int_0^\infty S_\chi(\omega) d\omega} \right]^{1/2} / \left[\int_0^\infty S_\chi(\omega) \omega^2 d\omega \right]. \quad (11)$$

Характеристику безпеки у формулі (10) можна визначити у просторі пружних згинальних моментів за відомою формулою [6]

$$\beta = \frac{\overline{M}_R}{\sqrt{\hat{M}_R^2 + \hat{M}^2}}, \quad (12)$$

де \overline{M}_R , \hat{M}_R – математичне сподівання та стандарт пружного згинального моменту, який відповідає несучій здатності сталевому підземному трубопроводу.

Числовий приклад. На основі викладеного матеріалу виконаємо імовірнісний розрахунок сталевого трубопроводу довжиною $L = 100$ м на міцність. Трубопровід має зовнішній діаметр $D = 70$ мм (товщина стінки 3 мм, момент опору перерізу трубопроводу $W = 10,173 \text{ см}^3$) та відповідну згинальну жорсткість $EI = 73,35 \text{ кН} \cdot \text{м}^2$. Він виготовлений зі сталі С235 з розрахунковим опором $R_y = 220$ МПа, границя плинності якої має математичне сподівання $\bar{R} = 300$ МПа та стандартне відхилення $\hat{R}_y = 24$ МПа. Математичне сподівання погонного навантаження від ваги ґрунту складає $\bar{q} = 9 \text{ кН/м}$. Ґрунт основи – дрібнозернистий сухий пісок із $\bar{c} = 6,2 \text{ Н/см}^3$. Для даної основи параметри спектральної щільності наступні: $\alpha = 2,75 \text{ м}^{-1}$; $\theta = 3,65 \text{ м}^{-1}$. За

ефективну ширину b_{eff} приймаємо зовнішній діаметр D трубопроводу. Коефіцієнт неоднорідності приймаємо рівним $\beta_0 = 1$.

Визначимо середній квадрат кривини осі балки. Згідно з (6) маємо

$$\bar{\chi}^2 = \int_0^{\infty} \frac{S_r(\omega)\omega^4}{(EI\omega^4 + b_{eff}\bar{c})^2} d\omega = 1,153 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-2}.$$

У відповідності до (5) стандарт пружного згинального моменту трубопроводу складає:

$$\bar{M} = 73,35(1,153 \cdot 10^{-4})^{1/2} = 0,787 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Для параметра ω_{χ} та коефіцієнта широкосмужності β_{χ} шляхом інтегрування відповідно виразів (10) і (11) отримаємо

$$\omega_{\chi} = 2,433 \text{ м}^{-1}; \quad \beta_{\chi} = 1,721.$$

Значення характеристичного максимуму внутрішнього пружного моменту визначаються за формулою (9):

$$\gamma_0 = \sqrt{2 \ln \left[\frac{2,433 \cdot 100}{1,721 \cdot \pi} \right]} = 2,759.$$

Для підземних трубопроводів різної довжини вони наведені у таблиці.

Параметри моделі абсолютних максимумів випадкових функцій внутрішнього пружного моменту та прогину

Випадкова функція	Характеристичні максимуми γ_0 та f_0 при довжині трубопроводу L , м					
	10	50	100	200	500	1000
$\bar{M}(x)$	1,734	2,495	2,759	3,000	3,291	3,496
$\tilde{f}(x)$	1,052	2,080	2,390	2,664	2,988	3,212

Прийmemo в першому наближенні, що

$$\bar{M}_R = \bar{R}_y W = 30 \cdot 10,173 = 3,052 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

$$\hat{M}_R = \hat{R}_y W = 2,4 \cdot 10,173 = 0,244 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

і визначимо характеристику безпеки (12):

$$\beta = \frac{3,052}{\sqrt{0,244^2 + 0,787^2}} = 3,702.$$

Для імовірності відмови сталевому трубопроводу остаточно маємо:

$$Q(L) = \exp[-0,5(2,759^2 - 3,702^2)] = 0,048.$$

Розрахунок надійності трубопроводу за критерієм жорсткості. Розрахунок на жорсткість за гранично допустимими прогинами виконується аналогічно. Як і при оцінці надійності за міцністю, будемо розглядати випадкову функцію прогину $\tilde{f}(x)$ з розподілом ординати за центрованим нормальним розподілом. Стандарт цього розподілу такий [6]:

$$\hat{f} = \left[\int_0^{\infty} S_f(\omega) d\omega \right]^{1/2}, \quad (13)$$

де $S_f(\omega)$ – спектральна щільність прогину балки,

$$S_f(\omega) = \frac{S_r(\omega)}{(EI\omega^4 + b_{eff}\bar{c})^2}. \quad (14)$$

Імовірність відмови, згідно з [3, 4], складає

$$Q(L) = \exp[-0,5(f_0^2 - \delta_f^2)], \quad (15)$$

де f_0 – характеристичний максимум випадкової функції $\tilde{f}(x)$; δ_f – нормоване відхилення граничного прогину балки f_u . Враховуючи, що математичне сподівання прогину балки дорівнює нулю, будемо мати:

$$\delta_f = f_u / \hat{f}. \quad (16)$$

Характеристичний максимум f_0 визначається за формулою (9), у яку замість ω_χ та β_χ підставляються відповідно значення ω_f та β_f , визначені за формулами (10), (11), де замість спектральної щільності кривини осі трубопроводу $S_\chi(\omega)$ фігурує спектральна щільність прогину балки $S_f(\omega)$.

Числовий приклад. Виконаємо імовірнісний розрахунок на надійність сталевого підземного трубопроводу за критерієм жорсткості. При цьому використаємо дані попереднього прикладу.

Для стандарту прогину будемо мати:

$$\hat{f} = \left[\int_0^{\infty} \frac{S_r(\omega)}{(EI\omega^4 + b_{eff}\bar{c})^2} d\omega \right]^{1/2} = 7,039 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Для параметра ω_f та коефіцієнта широкосмужності β_f шляхом інтегрування відповідно виразів (10) і (11) отримаємо

$$\omega_f = 0,941 \text{ м}^{-1}, \quad \beta_f = 1,722.$$

Значення характеристичного максимуму прогину, як і в попередньому випадку, визначаються за формулою (9):

$$f_0 = \sqrt{2 \ln \left[\frac{0,941 \cdot 100}{1,722 \cdot \pi} \right]} = 2,39.$$

Для підземних трубопроводів, що мають іншу довжину, характеристичні максимуми прогину наведено у таблиці.

Керуючись рекомендаціями [7], прийемо граничний прогин трубопроводу $f_u = 3$ см, що відповідає нормованому відхиленню від центра розподілу:

$$\delta_f = 3/0,704 = 4,26.$$

Для імовірності відмови сталевого підземного трубопроводу будемо остаточно мати:

$$Q(L) = \exp[-0,5(2,39^2 - 4,26^2)] = 0,002.$$

Висновки

1. Запропоновано досить зручну методику розрахунку сталевих підземних трубопроводів, що знаходяться на статистично неоднорідному ґрунті.

2. Наведена методика та числові приклади ілюструють простоту отримання оцінок надійності з використанням імовірнісного представлення навантажень у формі абсолютних максимумів випадкових функцій. Приклади також показують різницю в оцінках надійності за критеріями міцності і жорсткості та вплив на надійність сталевих трубопроводів коефіцієнтів широкосмужності.

Резюме

Изложены основные принципы расчета стальных подземных трубопроводов, расположенных на стохастической упругой основе, на надежность по критериям прочности и жесткости в технике абсолютных максимумов случайных функций. Приведены конкретные числовые примеры, которые иллюстрируют общую методику расчета.

1. Болотин В. В. Статистические методы в строительной механике. – М.: Стройиздат, 1965. – 279 с.
2. Болотин В. В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Стройиздат, 1982. – 351 с.
3. Пичугин С. Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Киев, 1994. – 32 с.

4. *Махінко А. В.* Надійність елементів металоконструкцій під дією випадкових змінних навантажень: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Полтава, 2006. – 24 с.
5. *Пічугін С. Ф., Махінко А. В.* Питання імовірнісного розрахунку сталевих підземних трубопроводів // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. – Вип. 9 – Рівне: УДУВГП, 2003. – С. 273 – 280.
6. *Пічугін С. Ф., Махінко А. В.* Оцінка надійності сталевих підземних трубопроводів: Зб. наук. пр. ПНТУ ім. Юрія Кондратюка: Галузеве машинобудування, будівництво. – 2003. – Вип. 12. – С. 183 – 188.
7. *СНиП 2.05.06-85.* Магистральные трубопроводы. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 52 с.

Поступила 05. 01. 2009