

## ДО ПИТАННЯ ЙМОВІРНІСНОГО РОЗРАХУНКУ СТАЛЕВОГО ПІДЗЕМНОГО МАГІСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДУ

*Розглянуто питання подальшого розвитку розрахунку надійності сталеві конструкції магістрального трубопроводу. Наведено порівняльний розрахунок та отримано кількісні показники надійності сталеві конструкції підземного магістрального трубопроводу з урахуванням мінливості внутрішнього тиску та перепаду температури, попереднього напруження від пружного згину.*

**Ключові слова:** надійність, кількісні показники надійності, підземний магістральний трубопровід, внутрішній тиск, перепад температури.

**Вступ.** Магістральні трубопроводи є об'єктами стратегічного значення для України. Урахування мінливості в часі навантажень, впливів та характеристик матеріалів дозволяє взяти до уваги взаємний вплив цих факторів на загальну надійність і знизити матеріалоемність трубопроводів, забезпечивши обґрунтовані значення параметрів безпеки [1 – 3]. Особливо актуальним це є зараз, коли термін експлуатації більшості магістральних трубопроводів складає 40 – 50 років, а відсутність можливості точного оцінювання залишкового рівня надійності може призвести до аварій цих конструкцій та значних економічних і соціальних збитків.

**Огляд останніх джерел досліджень та публікацій.** Виконані дослідження впливу стохастичної природи зовнішніх і внутрішніх факторів на надійність магістральних трубопроводів, описані в роботах В.В. Болотіна [4], С.М. Перова [5], Є.Р. Ставровського [6], S.G.L. Vabu [7] та інших, обмежуються лише окремими випадками нормальної експлуатації магістральних трубопроводів, у них також не наводяться кількісні оцінки надійності таких конструкцій. Крім того, більшість методик застосовують математичний апарат, який значно ускладнює використання отриманих залежностей на практиці. Тому вдосконалення методики оцінювання надійності сталеві конструкції магістрального трубопроводу та отримання кількісних оцінок надійності є актуальним завданням.

**Метою** статті є аналіз результатів розрахунку надійності сталеві конструкції магістрального трубопроводу, законструйованого на основі діючих норм.

**Основний матеріал і результати.** Оцінювати надійність магістрального трубопроводу будемо за роботою [8] на основі аналізу резерву міцності, який визначатимемо в просторі напружень таким чином:

$$\tilde{Y} = \tilde{R} - \tilde{S} = \tilde{\sigma}_y - \tilde{\sigma}_i \geq 0, \quad (1)$$

де  $\tilde{\sigma}_y$  – випадкова величина межі текучості сталі трубопроводу;

$\tilde{\sigma}_i$  – функція випадкової величини приведених напружень від зовнішнього навантаження і впливів об'ємного напружено-деформованого стану трубопроводу.

При розрахунку надійності будемо вважати (внаслідок забезпечення належної технології виробничого процесу), що порівняно з рештою детермінованими є такі розрахункові характеристики сталеві трубиного прокату:

– геометричні розрахункові параметри трубопроводу (внутрішній діаметр  $D_{\text{вн}}$ , товщина стінки трубопроводу  $\delta$ );

– деформаційні параметри сталі трубопроводу (модуль деформацій  $E$ , коефіцієнт Пуассона  $\mu$ , коефіцієнт лінійного температурного розширення  $\alpha$ ).

Статистичний розкид значень цих параметрів будемо вважати таким, що не

впливає на розкид результуючої функції резерву міцності, і в розрахунках прийматимемо як постійні величини.

Розрахунковими випадковими величинами, таким чином, у розглядуваній задачі надійності є:

- 1) межа текучості сталі трубопроводу  $\bar{\sigma}_y$ ;
- 2) внутрішній тиск у напірному магістральному трубопроводі  $\bar{p}$ ;
- 3) перепад температури трубопроводу  $\Delta\bar{t}$ ;
- 4) кривизна трубопроводу  $\bar{\kappa} = \frac{1}{\bar{\rho}}$  ( $\bar{\rho}$  – радіус кривизни).

Функція надійності для сталевих магістральних трубопроводів має вигляд

$$\tilde{Y}(\bar{\sigma}_y, \bar{p}, \Delta\bar{t}, \bar{\kappa}) = \bar{\sigma}_y - \sqrt{\left(\frac{\bar{p}D_{\text{вн}}}{2\delta}\right)^2 + \left(\mu\frac{\bar{p}D_{\text{вн}}}{2\delta} - \alpha E\Delta\bar{t}\right) \pm \frac{\bar{\kappa}D_{\text{зовн}} EK_{\text{зр}}}{2}} - \frac{\bar{p}D_{\text{вн}}}{2\delta} \left(\mu\frac{\bar{p}D_{\text{вн}}}{2\delta} - \alpha E\Delta\bar{t}\right) \pm \frac{\bar{\kappa}D_{\text{зовн}} EK_{\text{зр}}}{2}. \quad (2)$$

При нормальному законі розподілу для визначення ймовірності відмови достатньо обчислити характеристику безпеки

$$\beta = \frac{\bar{Y}}{\hat{Y}}, \quad (3)$$

де  $\bar{Y}$  – математичне очікування резерву міцності;

$\hat{Y}$  – стандарт резерву міцності.

Проведені в роботі [8] дослідження показали, що функція резерву міцності з достатньою точністю і забезпеченістю отримуваних результатів може бути лінеаризованою (заміненою прямою) на всьому діапазоні можливих значень випадкових аргументів. Для лінійної залежності функції надійності її статистичні параметри можуть бути обчислені за відповідними статистичними параметрами аргументів за формулами:

– математичне очікування

$$\bar{Y} = Y(\bar{R}_y, \bar{p}, \Delta\bar{t}, \bar{\kappa}); \quad (4)$$

– стандарт

$$\hat{Y} = \sqrt{A_1^2 \hat{R}^2 + A_2^2 \hat{p}^2 + A_3^2 (\Delta\hat{t})^2 + A_4^2 (\hat{\kappa})^2}, \quad (5)$$

де  $A_1 = \left. \frac{\partial Y}{\partial R} \right|_{R=\bar{R}}$ ,  $A_2 = \left. \frac{\partial Y}{\partial p} \right|_{p=\bar{p}}$ ,  $A_3 = \left. \frac{\partial Y}{\partial (\Delta t)} \right|_{\Delta t=\Delta\bar{t}}$ ,  $A_4 = \left. \frac{\partial Y}{\partial \kappa} \right|_{\kappa=\bar{\kappa}}$ ;

$$\bar{Y} = \bar{R} - \sqrt{\left(\frac{\bar{p}D_{\text{вн}}}{2\delta}\right)^2 + \left(\mu\frac{n\bar{p}D_{\text{вн}}}{2\delta} - \alpha E\Delta\bar{t} + \frac{D_{\text{зовн}} \bar{\kappa} EK_{\text{зр}}}{2}\right)^2} - \frac{\bar{p}D_{\text{вн}}}{2\delta} \left(\mu\frac{n\bar{p}D_{\text{вн}}}{2\delta} - \alpha E\Delta\bar{t} + \frac{D_{\text{зовн}} \bar{\kappa} EK_{\text{зр}}}{2}\right). \quad (6)$$

Для визначення стандарту  $\hat{Y}$  спочатку обчислимо необхідні розрахункові коефіцієнти:

$$A_1 = \frac{\partial Y}{\partial R} = 1; \quad (7)$$

$$A_2 = \left. \frac{\partial Y}{\partial p} \right|_{p=\bar{p}} = \frac{\frac{\delta \bar{\sigma}_{\text{кц}}^2}{\bar{p}} (2 - \mu) - 2\mu D_{\text{вн}} (\bar{\sigma}_{\text{позд}} + \bar{\sigma}_{\text{зс}}) - D_{\text{вн}} (\mu \bar{\sigma}_{\text{позд}} + \bar{\sigma}_{\text{зс}})}{2\delta \sqrt{\bar{\sigma}_{\text{кц}}^2 + (\bar{\sigma}_{\text{позд}} + \bar{\sigma}_{\text{зс}})^2} - \bar{\sigma}_{\text{кц}} (\bar{\sigma}_{\text{позд}} + \bar{\sigma}_{\text{зс}})}; \quad (8)$$

$$A_3 = \left. \frac{\partial Y}{\partial \Delta t} \right|_{\Delta t=\Delta\bar{t}} = \frac{\alpha E (\bar{\sigma}_{\text{кц}} - 2(\bar{\sigma}_{\text{позд}} + \bar{\sigma}_{\text{зс}}))}{2\sqrt{\bar{\sigma}_{\text{кц}}^2 + (\bar{\sigma}_{\text{позд}} + \bar{\sigma}_{\text{зс}})^2} - \bar{\sigma}_{\text{кц}} (\bar{\sigma}_{\text{позд}} + \bar{\sigma}_{\text{зс}})}; \quad (9)$$

$$A_4 = \frac{\partial Y}{\partial \kappa} \Big|_{\kappa=\bar{\kappa}} = - \frac{\left( D_{\text{вн}} p (1-2\mu) + 2\delta E (2\alpha\Delta t + \bar{\kappa} D_{\text{зовн}} K_{\text{сп}}) \right) \times}{2\sqrt{p^2 D_{\text{вн}}^2 (1-\mu + \mu^2) + D_{\text{вн}} p \delta E (1-2\mu) (2\alpha\Delta t + \bar{\kappa} D_{\text{зовн}} K_{\text{сп}})} + \frac{\times D_{\text{зовн}} E K_{\text{сп}}}{+\delta^2 E^2 (2\alpha\Delta t + \bar{\kappa} D_{\text{зовн}} K_{\text{сп}})^2}} \quad (10)$$

За наведеним вище алгоритмом можна виконати розрахунок надійності будь-якого магістрального трубопроводу, враховуючи мінливість у його параметрах: міцності сталі, робочому тиску, перепаді температури, глибині укладання.

Ця методика може застосовуватися як на стадії проектування, так і на стадії експлуатації магістрального трубопроводу: при прийнятті рішення про його капітальний ремонт, визначенні безпечного робочого тиску за умови фактичного технічного стану тощо.

Наприклад, на стадії проектування, порівнявши отриману ймовірність відмови ділянки магістрального трубопроводу з нормативним значенням для споруд такого типу (клас наслідків ССЗ, категорія відповідальності А) –  $1 \times 10^{-6}$ , можна виявити надлишковий запас надійності конструкції. Крім того, прийнявши нормативне значення ймовірності відмови як вихідне, за допомогою розробленої методики можна розв’язати і зворотну задачу: запроєктувати конструкцію трубопроводу із заданим рівнем надійності.

Для прикладу порівняємо результати розрахунку на міцність сталевого магістрального підземного нафтопроводу з прямошовних труб зовнішнім діаметром  $D_{\text{зовн}} = 1020$  мм та ймовірнісного розрахунку того ж самого магістрального нафтопроводу за викладеною вище методикою. Вихідними даними для розрахунку міцності були взяті: робочий тиск 5 МПа; додатний перепад температур  $\Delta t_{(+)} = 50^\circ\text{C}$ ; труби, виготовлені зі сталі марки 17Г1С-Т. Провівши розрахунок за нормами [9], отримали необхідну товщину стінки  $\delta = 12$  мм. Виконавши ймовірнісний розрахунок для розглядуваного прикладу з умови забезпечення заданого рівня надійності для споруд такого типу, дійшли висновку, що товщину стінки підземного магістрального трубопроводу можна зменшити до 11 мм. Ймовірність відмови конструкції при цьому становить що менше за нормативну [10].

$$Q_{\text{opt}}(\beta) = 0,64 \cdot 10^{-6},$$

Спорудження трубопроводу, законструйованого за ймовірнісним розрахунком, дозволяє в цьому випадку зекономити 8% вартості сталі в споруді.

Основним параметром навантаження трубопроводу, який визначає конструкцію і надійність магістрального трубопроводу, є робочий тиск продукту, що транспортується. Для визначення впливу зміни робочого тиску на надійність магістрального трубопроводу було виконано розрахунки ділянки магістрального трубопроводу «Лисичанськ – Кременчук» при зміні робочого тиску в ньому та його діаметра (який визначає пропускну здатність).

Результати розрахунків характеристики безпеки при зміні вказаних параметрів наведені в таблиці 1 та у графічному вигляді на рисунках 1, 2.

**Таблиця 1 – Значення параметра надійності  $\beta$  магістрального нафтопроводу залежно від середнього тиску та діаметра**

Робочий тиск р, МПа	Параметр надійності $\beta$ залежно від зовнішнього діаметра $D_s$ , мм			
	720	820	1020	1220
3,5	6,20	5,85	5,49	5,45
4,0	6,04	5,67	5,46	5,45
4,5	5,87	5,69	5,53	5,43
5,0	5,70	5,72	5,45	5,44
5,5	5,76	5,57	5,49	5,43
6,0	5,61	5,60	5,48	5,43

З аналізу графіків на рисунках 1 і 2 видно, що при збільшенні діаметра трубопроводу його надійність зменшується. При цьому розкид у значеннях характеристики безпеки для трубопроводів малого діаметра можна пояснити конструктивними обмеженнями мінімальної товщини стінки трубопроводу, що, звичайно, значно збільшує запас міцності й відповідно надійність.

Для трубопроводів великого діаметра такого розкиду не спостерігається, а характеристика безпеки приймає значення, близьке до 5,45.

Як показує аналіз, значний вплив на напружено-деформований стан і на значення розрахункової товщини стінки трубопроводу чинить неточність його укладання. Це враховується в описаній методиці розрахунку надійності параметром відхилення від проектної кривизни  $\tilde{\kappa}$ .

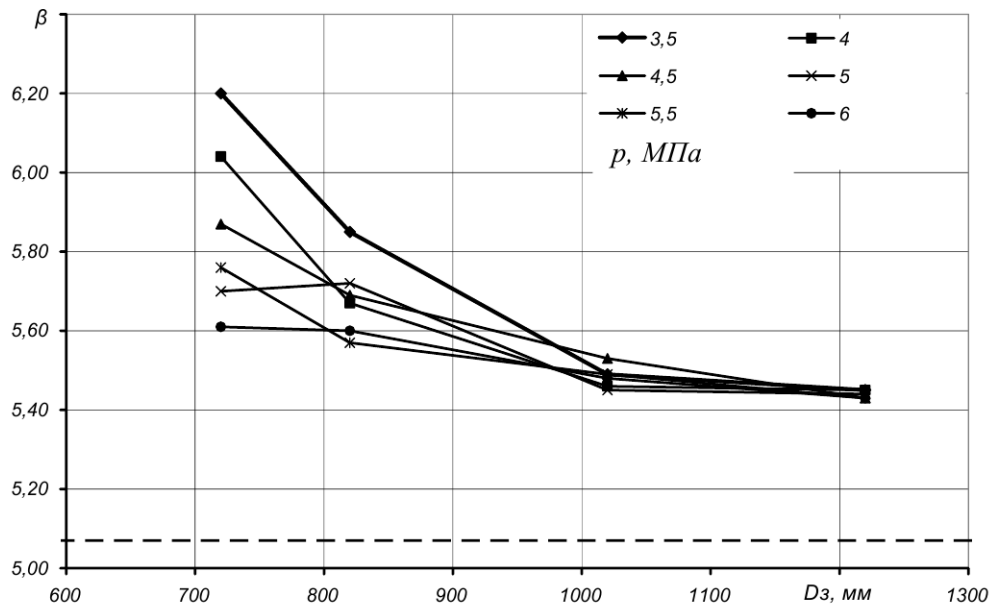


Рис. 1. Залежність характеристики безпеки магістральних нафтопроводів від зовнішнього діаметра при різних робочих тисках: — — — нормативне значення характеристики безпеки

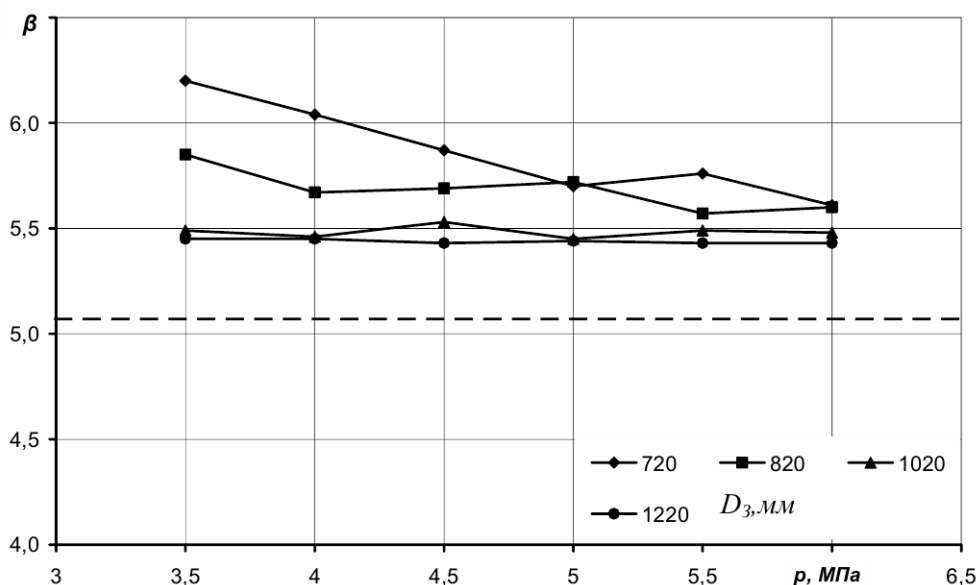


Рис. 2. Графіки залежностей  $\beta - p$  при різних діаметрах (зовнішніх) трубопроводу й мінімальній розрахунковій товщині стінки  $\delta$

### **Висновки:**

1. Теорія надійності може бути адаптована для розрахунку сталеві конструкції магістрального трубопроводу з урахуванням навантажень від внутрішнього тиску, температурних впливів, впливу напружень трубопроводу від пружного згину, реакції ґрунту основи.

2. Розрахунок надійності сталеві конструкції магістрального трубопроводу, законструйованого на основі нормативного розрахунку, виявляє значний резерв надійності, котрий характеризується значенням імовірності відмови  $Q(\beta) = 2,82 \cdot 10^{-10} \dots 5,45 \cdot 10^{-7}$ .

3. Урахування малої ймовірності одночасної реалізації розрахункових значень випадкових величин навантажень і впливів від тиску, перепаду температури та пружного згину в розрахунку надійності дозволяє зменшити витрати сталі на спорудження сталеві конструкції магістральних трубопроводів до 8%.

4. При підвищенні діаметра магістрального трубопроводу його надійність зменшується, незважаючи на відповідне збільшення товщини стінки. При збільшенні робочого тиску надійність магістральних трубопроводів майже не змінюється.

### *Література*

1. Перельмутер, А.В. *Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций* / А.В. Перельмутер. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – К.: УкрНИИПроектстальконструкция, 2000. – 216 с.

2. Пичугин, С.Ф. *Надежность стальных конструкций производственных зданий = Reliability of Industrial Building Steel Structures: монографія* / С.Ф. Пичугин. – М.: Ассоциация строительных вузов, 2011. – 456 с.: ил.

3. Augusti, G. *Probabilistic Methods in Structural Engineering* / G. Augusti, A. Baratta, F. Casciati // Chapman and Hall (Methuen, Inc.). – New York, 1984. – 556 p.

4. Болотин, В.В. *Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений* / В.В. Болотин. – 2-е изд., доп. – М.: Стройиздат, 1982. – 351 с.

5. Перов, С.М. *Разработка методов оценки показателей надежности трубопроводных систем при проектировании и эксплуатации: автореф. дис. на соискание науч. степени докт. техн. наук: спец. 01.02.06 – динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры* / С.М. Перов. – Самара, 2009. – 40 с.

6. Ставровский, Е.Р. *Математические модели и методы расчета надежности газопроводных сетей и систем* / Е.Р. Ставровский, М.Г. Сухарев, Д.Л. Ткач. – М.: ИНЭИ РАН, 1994. – 73 с.

7. Babu, S. G. L. *Reliability analysis of buried flexible pipe-soil systems* / S. G. L. Babu, A. Srivastava // *Journal of Pipeline Systems / Engineering and Practice, ASCE*. – 2010. – №1 (1). – P. 33 – 41.

8. Зима О.Є. *Надійність сталеві конструкції магістрального трубопроводу: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди* / О.Є. Зима. – Полтава, 2014. – 24 с.

9. СНиП 2.01.06-85. *Магистральные трубопроводы* / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 52 с.

10. ДБН В.1.2-14-2009. *Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ*. – К.: Мінрегіонбуд, 2009. – 29 с.