

УДК 624.014.042:519.2

С.Ф. Пичугін, д.т.н., професор
П.Ю. Винников, магістрант

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

РОЗРАХУНОК РІВНЯ НАДІЙНОСТІ ЛІНІЙНОЇ ЧАСТИНИ ПІДЗЕМНИХ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

Виведено параметри кореляційної функції та спектральної щільності випадкового стаціонарного ергодичного процесу неоднорідності ґрунтових умов за довжиною трубопроводу. Отримано значення рівня надійності лінійної частини підземного магістрального газопроводу за параметром нерівномірних осідань та сумарних поздовжніх напружень.

Ключові слова: *випадкова функція неоднорідності ґрунтових умов, кореляційна функція, спектральна щільність, підземний трубопровід.*

УДК 624.014.042:519.2

С.Ф. Пичугин, д.т.н., профессор
Ф.Ю. Винников, магистрант

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

РАСЧЕТ УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ ПОДЗЕМНОГО МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА

Выведены параметры корреляционной функции и спектральной плотности случайного стационарного эргодического процесса неоднородности грунтовых условий по длине трубопровода. Получены значения уровня надежности линейной части подземного магистрального газопровода по параметру неравномерных осадок и суммарных продольных напряжений.

Ключевые слова: *случайная функция неоднородности грунтовых условий, корреляционная функция, спектральная плотность, подземный трубопровод.*

UDC 624.014.042:519.2

S.F. Pichugin, ScD, Professor
P.Y. Vynnykov, master student

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

CALCULATION OF THE RELIABILITY LEVEL OF THE BURIED PIPELINES LINEAR PART

Parameters of the correlation function and the spectral density of a stationary ergodic random process of soil conditions heterogeneity along the pipeline are derived in the article. There are obtained values of the reliability level of the buried gas pipeline linear part by parameters of differential settlements and total longitudinal stresses.

Keywords: *random function of soil conditions heterogeneity, correlation function, spectral density, buried pipelines.*

Вступ. Трубопровідний транспорт за своєю фізичною суттю та інженерним рішенням – найбільш безпечний спосіб доставки пожежо- й вибухонебезпечних рідких і газоподібних вуглеводів. Однак ця безпека гарантується при виконанні ряду обов'язкових умов [1 – 3]:

- дотримання всіх нормативних вимог при проектуванні, будівництві та експлуатації трубопровідних систем;
- використання ймовірнісних методів розрахунку з урахуванням неоднорідності зовнішніх навантажень та реакції ґрунтової основи;
- створення системних функціональних резервів у вигляді багатониткових газопроводів з перемичками підземних сховищ газу і проміжних резервуарних парків нафти і нафтопроводів;
- використання при проектуванні сучасних способів вишукувань;
- дотримання високої якості будівництва;
- забезпечення високого рівня автоматизації технологічних процесів;
- використання сучасних засобів діагностики і моніторингу;
- обслуговування систем висококваліфікованими кадрами.

Імовірнісний підхід до розрахунку магістральних трубопроводів започаткував В.В. Болотін. У його роботах [4] розроблено методику представлення навантаження та реакцій основи у формі випадкової функції (ВФ), виведено функції, що дозволяють обчислити рівень надійності лінійної частини підземних магістральних трубопроводів (ЛЧМТ) на неоднорідній основі вінклерівського типу [5, 6].

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Оцінка надійності всієї газопровідної системи складається з виділення однорідних груп елементів системи (компресорні станції, лінійні частини магістральних трубопроводів) з подальшим аналізом відмов підсистем [2 – 4].

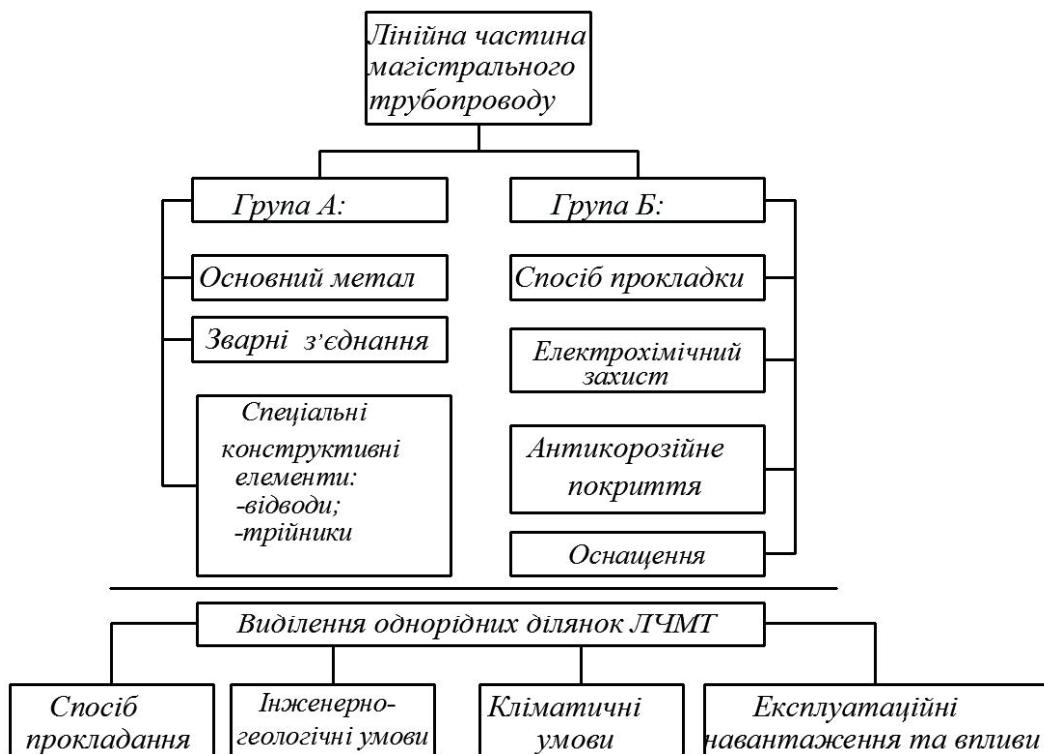


Рис. 1 – Виділення однорідних ділянок лінійних частин магістральних трубопроводів

Виділяють два рівні поділу конструкції на розрахункові ділянки [2]:

- поділ конструкції на елементи відповідно до обраних при оцінюванні напружено-деформованого стану розрахункових схем;
- виділення ділянок з однорідними характеристиками за обраною групою параметрів.

Перелік параметрів залежить від характеристик конструкції, виду розрахунків, типів можливих відмов та граничних станів, що реалізуються на виділеній розрахунковій ділянці [2, 7]. З метою поділу магістральних трубопроводів на конструктивні рівні та елементи застосовується методологія системної теорії надійності (рис. 1). У роботі доцільно сконцентрувати увагу на рівні, для якого об'єктом дослідження є ЛЧМТ.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. За результатами вивчення роботи підземного трубопроводу під дією зовнішніх навантажень виявлено, що один з найважливіших параметрів у рівнянні зігнутої осі трубопроводу – це механічні характеристики ґрунту основи, тобто модуль деформації [4, 5]. Але застосування ймовірнісних підходів у механіці ґрунтів – це новий, малодосліджений розділ [8, 9], який достатньо важко застосовувати внаслідок значної неоднорідності ґрунтових масивів порівняно з іншими будівельними конструкціями.

Тому за мету роботи прийнято отримати числові значення рівня надійності ЛЧМТ з урахуванням випадкової неоднорідності ґрунтових умов.

Основний матеріал і результати дослідження. ЛЧМТ постійно знаходиться у взаємодії з ґрунтом. По-перше, природний ґрунт або ж ґрунтовий (піщаний) насип виступає основою, на яку власне і вкладається трубопровід. По-друге, ґрунт використовується як матеріал зворотної засипки, а отже, є важливим компонентом у визначенні зовнішніх навантажень на трубопровід [3].

Через незначну вагу труб і речовин, що транспортуються, тиск під трубопроводом не перевищує розрахунковий опір ґрунту, відповідно залежність між напруженнями основи та осіданнями знаходиться у лінійній стадії, що свідчить про можливість використання гіпотези Вінклера. Розрахункову модель трубопроводу при поперечних переміщеннях труби «вниз» визначають такою залежністю [3]:

$$\begin{cases} c = c_{yo} D_n y & \text{при } y \leq R_{ep} / c_{yo}; \\ c = R_{ep} D_n & \text{при } y > R_{ep} / c_{yo}, \end{cases} \quad (1)$$

де c – опір ґрунту вертикальним переміщенням труби «вниз»; c_{yo} – одиничний коефіцієнт нормального опору ґрунту (коефіцієнт пружної вінклерівської основи); D_n – зовнішній діаметр труби, м; y – вертикальне переміщення труби «вниз», м; R_{ep} – розрахунковий опір ґрунту, кПа.

Одиничний коефіцієнт нормального опору ґрунту у першу чергу залежить від модуля деформації ґрунту:

$$c_{yo} = \frac{0,12 \cdot E_{zp}}{(1 - \mu_{zp}^2) \sqrt{l_0 \cdot D_n}}, \quad (2)$$

де E_{zp} – модуль деформації ґрунту, МПа; μ – коефіцієнт Пуассона; l_0 – одинична довжина трубопроводу, м; D_n – зовнішній діаметр труби, м.

Значення коефіцієнта Пуассона та зовнішнього діаметра труби для конкретного трубопроводу – величини постійні, отже, основна змінна – модуль деформації ґрунту [4].

Для оцінювання неоднорідності модуля деформації та відповідно коефіцієнта пружної основи використані дані інженерно-геологічних досліджень кафедри ВНГіГ ПолНТУ [8, 9] контролю якості ущільнення піщаного насипу в м. Комсомольськ (рис. 2).

Статистичні дані вибиралися таким чином, щоб утворити трасу, наближену до «прямої», відстань між точками відбору дослідних кілець складала близько 20 м. Отримані значення модуля деформації ґрунту визначаються для інтервалу напружень $\sigma \in [0,05..0,1]$ МПа, це пов'язано зі значеннями реальних напружень під трубою.

Ґрунт насипу – пісок мілкий однорідний, коефіцієнта Пуассона $\mu = 0,3$.

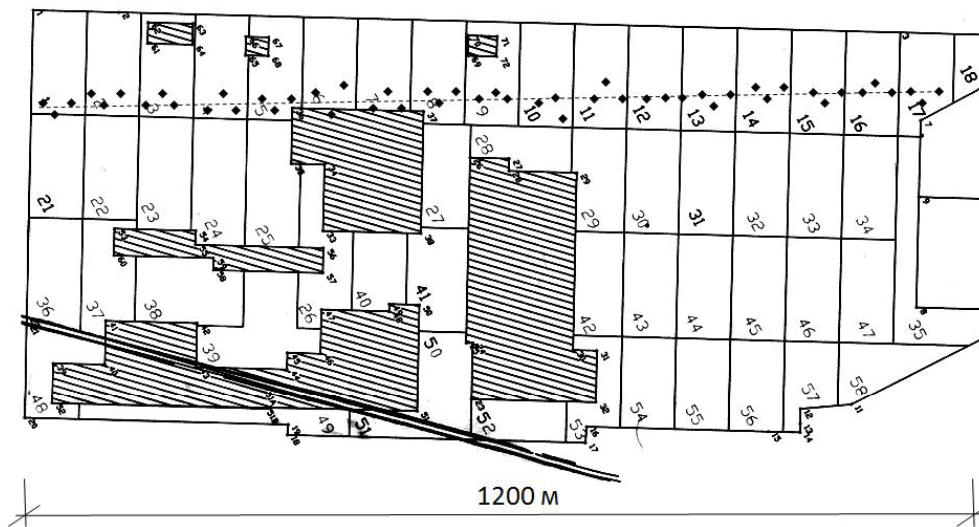


Рис. 2 – Поділ штучного насипу на дослідні квадрати, точки відбору дослідних кілець

Прийmemo гіпотезу, що ВФ зміни модуля деформації (коефіцієнта пружної основи) є стаціонарною та ергодичною функцією [2, 5]. Стаціонарність означає, що її математичне очікування (МО) є константою, а кореляційна функція – функцією зсуву між аргументами [10, 11].

Ергодична властивість полягає у тому, що єдина реалізація, при достатньо великій довжині (що перевищує період кореляції) – достовірний

представник усієї сукупності реалізацій випадкових функцій, тобто всі числові характеристики можна визначити з однієї реалізації [10, 11].

Таблиця 1 – Статистичні дані модуля деформації та коефіцієнта пружної основи

№ квадрата	Тиск у компресійному приладі			Значення коефіцієнта пружної основи, для труби діаметром $D_{\text{зн}} = 1020\text{мм}$		
	$\sigma = 0,05 \dots 0,1 \text{ МПа}$					
	Випадкові величини E , МПа			Випадкові величини c_{yo} , кН/м^2		
1	8	8	13	1044,551	1044,551	1697,396
2	13	14	13	1697,396	1827,965	1697,396
3	6	5	6	783,4134	652,8445	783,4134
4	11	11	17	1436,258	1436,258	2219,671
5	17	11	8	2219,671	1436,258	1044,551
6	11	10	17	1436,258	1305,689	2219,671
7	6	8	6	783,4134	1044,551	783,4134
8	11	7	6	1436,258	913,9823	783,4134
9	6	7	5	783,4134	913,9823	652,8445
10	11	8	7	1436,258	1044,551	913,9823
11	8	6	8	1044,551	783,4134	1044,551
12	11	14	17	1436,258	1827,965	2219,671
13	17	12	16	2219,671	1566,827	2089,103
14	10	11	11	1305,689	1436,258	1436,258
15	8	9	11	1044,551	1175,12	1436,258
16	11	15	15	1436,258	1958,534	1958,534
17	7	7	5	913,9823	913,9823	652,8445

Для доведення цієї гіпотези необхідно, щоб отримана кореляційна функція випадкового процесу при $\xi \rightarrow \infty$, $k_x(\xi) \rightarrow 0$ (тобто кореляційний зв'язок між значеннями випадкової функції нескінченно зменшується відповідно до збільшення відстані між ними) [10, 11].

Визначення числових характеристик стаціонарної ергодичної випадкової функції з досліду (табл. 1)

$$m_x(l) = \overline{c_{yo}} = const = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{51} x(l_i) = 1347,471 \text{ кН/м}^3 \quad (3)$$

Дисперсія та стандарт обчислюються аналогічно

$$D = const = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{51} [x(l_i) - m_x(l)]^2 = 232769,8 \left[\text{кН/м}^3 \right]^2, \quad \sigma = \sqrt{D} = 482,4623 \text{ кН/м}^3. \quad (4)$$

Для визначення нормованої кореляційної функції (НКФ) необхідно перемножити значення центрованої функції, розділені інтервалом $\xi = 0, 20, 40, 60 \dots$, та ділити суму добутків відповідно на $n - 0 = 51$, $n - 1 = 50, \dots$ і дисперсію випадкового процесу [10, 11].

$$k_x(\xi) = \frac{\left(\frac{1}{n-m}\right)}{D} \sum_{i=1}^{n-m} [(x(l_i) - m_x(l)) \cdot (x(l_{i+m}) - m_x(l))]. \quad (5)$$

Графік функції (5) зображено на (рис. 3) у вигляді точок, з'єднаних пунктирною лінією. Як бачимо, кореляція між перерізами ВФ дуже швидко згасає, що свідчить про високу внутрішню неоднорідність процесу за довжиною L ; не досить плавний хід цієї кривої можна пояснити недостатньою кількістю статистичних даних або ж певними проблемами випробувань під час польових та лабораторних випробувань. З метою надати графіку більш плавного характеру і виключити певні викиди слід апроксимувати отримані дані за допомогою методу найменших квадратів (МНК) функцією (6) [2, 10, 11]

$$k_x(\xi) = e^{-\alpha|\xi|} \cos \theta\xi, \quad (6)$$

де α, θ – параметри розподілу; ξ – зсув між перерізами процесу, 20 м.

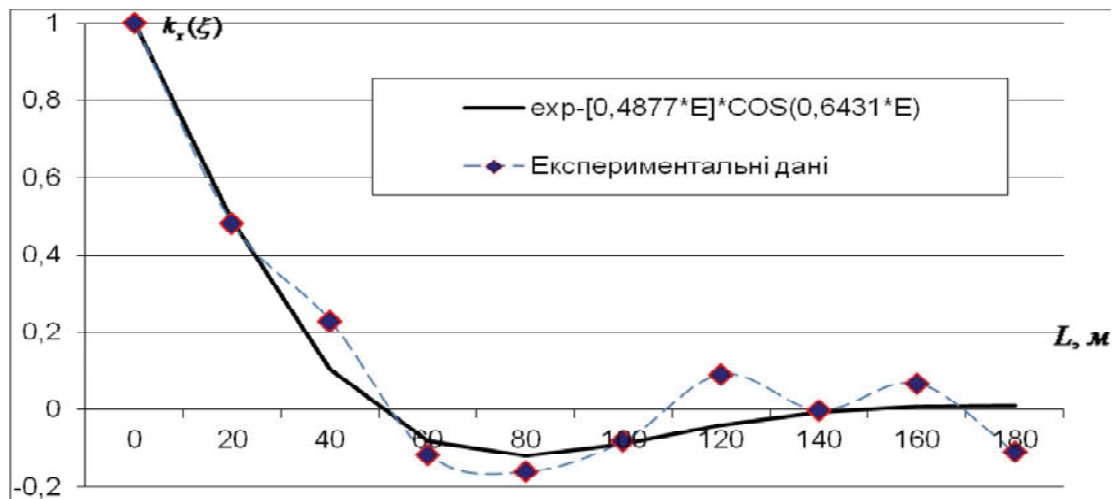


Рис. 3 – Побудова НКФ за експериментальними даними та подальша апроксимація МНК

Характер отриманої кореляційної функції (рис. 3) свідчить, що функція неоднорідності ґрунтових умов містить у собі приховані періодичності. Ці періодичності можуть бути зумовлені технологією відсипання піщаної подушки або ж закриття траншеї [2, 5].

У результаті доведено гіпотезу про ергодичність ВФ, а також отримано значення параметрів НКФ $\alpha = 0,4877$, $\theta = 0,6431$, за якими можна побудувати спектральну щільність, що відповідає НКФ випадкового процесу неоднорідності ґрунтових умов [2, 10, 11],

$$S_r(\omega) = \frac{\alpha\beta_0^2\bar{q}^2}{\pi} \left[\frac{1}{(\omega-\theta)^2 + \alpha^2} + \frac{1}{(\omega+\theta)^2 + \alpha^2} \right], \quad (7)$$

де β_0 – коефіцієнт неоднорідності, який характеризує розкид сумарного навантаження на трубопровід.

Зв'язок між спектрами ВФ неоднорідності ґрунтових умов та ВФ згинального моменту ЛЧМТ виводиться з диференціального рівняння зігнутої осі трубопроводу [2]

$$S_{\chi}(\omega) = \frac{S_r(\omega)\omega^4}{(EI \cdot \omega^4 + \bar{c}_{y0})^2}, \quad (8)$$

де \bar{c}_{y0} – МО погонного коефіцієнта жорсткості основи, кН/м².

Ордината випадкової функції $\tilde{M}(x)$ розподілена за нормальним законом з нульовим МО та стандартом \hat{M} , який однозначно обчислюється через згинальну жорсткість балки EI та середній квадрат кривини осі балки $\bar{\chi}^2$

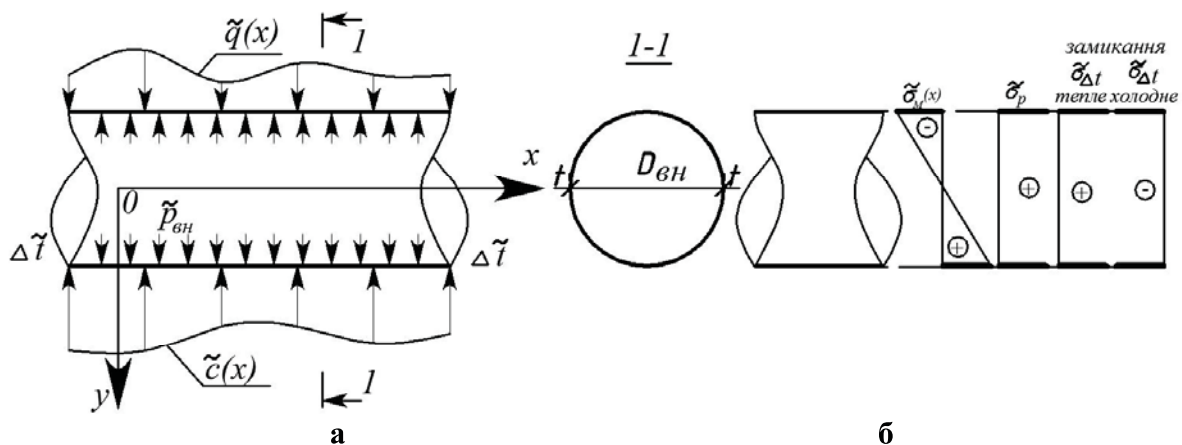
$$\hat{M} = EI \cdot \left[\int_0^{\infty} S_{\chi}(\omega) d\omega \right]^{1/2}. \quad (9)$$

Навантаження, що діють на ЛЧМТ, поділимо на два класи (рис. 4). Перший клас – це зовнішні фактори, які викликають нерівномірні осідання, вони представлені у формі ВФ [5, 6]:

- вага ґрунту зворотної засипки (над трубопроводом) \tilde{q}_1 , труби \tilde{q}_2 , ізоляції \tilde{q}_3 , внутрішнього вмісту трубопроводу (нафта, газ тощо) \tilde{q}_4 ;
- нерівномірність фізико-механічних характеристик ґрунтової основи під трубопроводом, погонний коефіцієнт пружної основи \tilde{c}_{y0} .

До другого класу віднесемо фактори, що викликають поздовжні напруження ЛЧМТ, вони представлені у формі випадкових величин:

- внутрішній (робочий) тиск продукту, що транспортується $\tilde{p}_{вн}$;
- напруження і деформації від перепаду температур $\Delta\tilde{t}$.



**Рис. 4 – Зовнішні навантаження на ЛЧМТ та відповідні внутрішні зусилля:
а – схема прикладання навантажень; б – епюри поздовжніх напружень у стінці трубопроводу**

Ураховуючи, що замикання трубопроводу за технологічними вимогами зазвичай виконують у теплий період року, отже, максимальний температурний перепад викликає напруження розтягу [6].

Умова міцності зводиться до вимоги, щоб сумарні поздовжні напруження у стінці трубопроводу за модулем $|\sum \sigma_{\text{нозд}}|$ були менші за межу текучості металу труб R_y [5]. Функція надійності ЛЧМТ за параметром сумарних поздовжніх напружень матиме такий вигляд:

$$P(L) = 1 - Q(L) = P[\sup_{0 \leq x \leq L} |\sum \sigma_{\text{нозд}}| < R_y], \quad (10)$$

де $\sup_{0 \leq x \leq L} |\sum \sigma_{\text{нозд}}|$ – верхня межа значень функції $|\sum \sigma_{\text{нозд}}|$ в інтервалі $0 \leq x \leq L$, а $Q(L)$ – імовірність відмови ЛЧМТ по довжині L .

Найчастіше несуча здатність трубопроводу має гаусовський розподіл, відповідно розподіл сумарних поздовжніх напружень, тому резерв несучої здатності також розподілено за нормальним законом. Тоді ймовірність відмови визначатиметься у формі абсолютних максимумів як [2, 5]

$$Q(L) = \exp[0,5(\gamma_0^2 - \beta^2)], \quad (11)$$

де γ_0 – характеристичний максимум випадкової функції $\sum \sigma_{\text{нозд}}(x)$; β – характеристика безпеки. Згідно з даними роботи [4]

$$\gamma_0 = \sqrt{2 \ln \left[\frac{\omega_\chi L}{\pi \cdot \beta_\chi} \right]}, \quad (12)$$

де ω_χ – параметр, аналогічний ефективній частоті випадкового процесу, м^{-1} . Він характеризує мінливість кривини осі трубопроводу, а також сумарних поздовжніх напружень за його довжиною; β_χ – коефіцієнт широкосмуговості ВФ $\sum \sigma_{\text{нозд}}(x)$ [4, 5].

$$\omega_\chi = \left[\int_0^\infty S_\chi(\omega) \omega^2 d\omega / \int_0^\infty S_\chi(\omega) d\omega \right]^{1/2}, \quad (13)$$

$$\beta_\chi = \left[\int_0^\infty S_\chi(\omega) \omega^4 d\omega / \int_0^\infty S_\chi(\omega) \omega^2 d\omega \right]^{1/2}. \quad (14)$$

Характеристика безпеки визначається з припущення незалежності дії поздовжньої (розтяжної сили) та згинального моменту.

Поздовжня сила у трубопроводі N [7, 12] обчислюється так:

$$N = \bar{N}_p - \bar{N}_{\Delta t} = F(\mu \frac{pD_{\text{вн}}}{2\delta} - \alpha E \Delta t) = F(0,15 \frac{\bar{p}D_{\text{вн}}}{\delta} - 0,252 \Delta \bar{t}), \quad (15)$$

де α – коефіцієнт лінійного розширення металу труби, $12 \cdot 10^{-6} \text{град}^{-1}$; E – модуль Юнга, МПа $2,1 \cdot 10^4 \text{кН/см}^2$; $\Delta \bar{t}$ – математичне очікування температурного перепаду, $^\circ\text{C}$; μ – коефіцієнт Пуассона, для сталі 0,3; \bar{p} – математичне очікування робочого тиску в трубі, кН/см^2 ;

$D_{вн}$ – внутрішній діаметр труби, см; t – номінальна товщина стінки труби, см; F – площа стінки труби, см².

Ураховуючи фізичний зміст поздовжньої сили у трубопроводі, а також те, що МО згинального моменту в трубопроводі дорівнює нулю ($\bar{M} = 0$), остаточно отримаємо МО \bar{Y} ВФ зміни сумарних поздовжніх напружень за довжиною трубопроводу \bar{Y} у формі

$$\bar{Y} = \bar{\sigma}_y - \frac{\bar{N}_{\Delta t} - \bar{N}_p}{F}. \quad (16)$$

Остаточно характеристика безпеки β матиме такий вигляд:

$$\beta = \frac{\bar{\sigma}_y - \frac{\bar{N}_{\Delta t} - \bar{N}_p}{F}}{\sqrt{\bar{\sigma}_y^2 + \frac{1}{F^2} \bar{N}_{\Delta t}^2 + \frac{1}{F^2} \bar{N}_p^2 + \frac{1}{W^2} \cdot \bar{M}^2}}. \quad (17)$$

Розрахунок рівня надійності ЛЧМТ за параметром жорсткості (нерівномірних осідань) має аналогічний характер, і його неодноразово викладено у літературі [2, 5].

Числовий приклад. Для розрахунку ЛЧМТ експериментальними даними скористаємося Звітом про капітальний ремонт газопроводу Острогоськ – Шебелинка 1 н., DN 1000, км 147 – 154.

Інженерно-геологічний розріз траси газопроводу в цілому однорідний і представлений піском мілким однорідним, малого ступеня водонасичення, що дає підстави використати статистичні характеристики, отримані вище [8, 9].

Таблиця 2 – Результати розрахунків товщини стінки газопроводу

Вихідні дані									Результати розрахунку	
Категорія газопроводу [7]	Труби $D \times t$, мм	ТУ	Марка сталі	R_1 , кН/см ²	m	k_1	k_n	R_2 , Н/см ²	Товщина стінки t , см	
									Розрахункова	Проектна
I-II	1020x11,2	ТУ У27.2-00191135-016Ж2007	K55	55	0,75	1,34	1	41	0,98	1,12
III-IV	1020x9,6	ТУ У27.2-00191135-016Ж2007	K55	55	0,9	1,34	1	41	0,82	0,96

R_1 – тимчасовий опір стиску (розтягу), МПа; R_2 – границя текучості, МПа; k_1 – коефіцієнт надійності за матеріалом; k_n – коефіцієнт надійності за призначенням трубопроводу; m – коефіцієнт умов роботи трубопроводу.

Таблиця 3 – Визначення рівня надійності ЛЧМТ за параметром сумарних поздовжніх напружень та нерівномірних осідань

Параметр	Значення	Ділянка 1	Ділянка 2
Зовнішній діаметр	D_{zn} , м	1,020	1,020
Товщина стінки труби	t , м	0,0112	0,0096
МО міцності сталі трубопроводу	$\bar{\sigma}_y$, кН/см ²	49	49
Стандарт міцності сталі трубопроводу	$\hat{\sigma}_y$, кН/см ²	4,9	4,9
Довжина ділянки	L , м	1247	6036
МО ваги ґрунту засипки [8, 9]	\bar{q}_1 , кН/м	32,1	32,1
МО ваги трубопроводу, ізоляції, продукту [6, 7]	$\sum \bar{q}_{2-4}$, кН/м	3,17	2,72
МО погонного коефіцієнта пружної основи [8, 9]	\bar{c}_{yo} , кН/м ²	1347	1347
Значення параметрів кореляційної функції неоднорідності ґрунтових умов	α , м ⁻¹	0,4877	0,4877
	θ , м ⁻¹	0,6431	0,6431
МО температурного перепаду (замикання у теплу пору року) [6]	$\bar{\Delta t}$, °С	30,6	30,6
Стандарт температурного перепаду (замикання у теплу пору року) [6]	$\Delta \hat{t}$, °С	10,2	10,2
МО внутрішнього тиску на вході у трубопровід [6]	\bar{p} , кН/см ²	0,456	0,456
Стандарт внутрішнього тиску на вході у трубопровід [6]	\hat{p} , кН/см ²	0,0314	0,0314
Коефіцієнт неоднорідності	β	1	1
Параметри міцності			
Стандарт згинального моменту	\hat{M} , кНм	159,407	149,335
МО поздовжньої (розтяжної) сили	\bar{N} , кН	4900	4523
Стандарт поздовжньої (розтяжної) сили	\hat{N} , кНм	1061	932,9
Характеристика безпеки	β	5,666	5,396
Мінливість кривини осі трубопроводу	$\omega_{\omega\chi}$, м ⁻¹	0,324	0,334
Коефіцієнт широкосмуговості ВФ	$\beta_{\omega\chi}$	1,957	1,927
Характеристичний максимум ВФ	γ_0	2,893	3,409
Імовірність відмови ЛЧМТ	$Q(t)$	7,016·10⁻⁶	1,587·10⁻⁴
Параметри жорсткості			
Стандарт нерівномірного осідання	\hat{f} , кНм	7,413·10 ⁻³	7,464·10 ⁻³
МО поздовжньої (розтяжної) сили	$[f]$, м	0,1	0,1
Характеристика безпеки	β	13,49	13,39
Мінливість нерівномірного осідання	ω_{of} , м ⁻¹	0,116	0,121
Коефіцієнт широкосмуговості ВФ	β_{of}	1,747	1,745
Характеристичний максимум ВФ	γ_0	2,559	3,127
Імовірність відмови ЛЧМТ	$Q(t)$	1,2·10⁻³⁸	7,057·10⁻³⁶

Висновок. Таким чином, доведено гіпотезу про стаціонарність та ергодичність ВФ неоднорідності ґрунтових умов за довжиною трубопроводу. Отримано апроксимуючу кореляційну функцію й відповідну спектральну щільність функції неоднорідності ґрунтових умов.

Одержані значення рівня надійності ЛЧМТ за параметром міцності свідчать про запаси, що закладаються при розрахунку магістральних трубопроводів на міцність та стійкість за нормативною методикою.

Рівень надійності ЛЧМТ за параметром жорсткості підтвердив, що характеристики деформативності ґрунтової основи є найважливішим критерієм у визначенні неоднорідних осідань. Унаслідок високих деформативних характеристик основи для обраної ділянки трубопроводу отримані високі значення надійності ЛЧМТ, але за наявності локального замкання, просадочних властивостей ґрунту, суфозії рівень надійності може значно зменшуватися.

Література

1. Харитонов В.А. *Строительство магистральных трубопроводов нефти и газа* / В.А. Харитонов. – М.: АСВ, 2008. – 496 с.
2. РД 51-4.2-003-97. *Методические рекомендации по расчетам конструктивной надежности магистральных газопроводов*. – М.: ИРЦ Газпром, 1997. – 90 с.
3. Айнбиндер А.Б. *Расчет магистральных и промышленных трубопроводов на прочность и устойчивость* / А.Б. Айнбиндер. – М.: Недра, 1991. – 284 с.
4. Болотин В.В. *Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений*. – М.: Стройиздат, 1982. – 351 с.
5. Pichugin S.F. *Calculation of the reliability of steel underground pipelines* / S.F. Pichugin, A.V. Makhin'ko // *Strength of Materials*. Vol. 41. – Number 5. – Springer Science, 2009. – P. 541 – 547.
6. Пічугін С.Ф. *Врахування факторів, які впливають на напружено-деформований стан сталевих підземних трубопроводів* / С.Ф. Пічугін, О.Є. Зима // *Бетон и железобетон в Украине*. – 2013. – №4 (74). – С. 31 – 34.
7. СНиП 2.05.06-85. *Магистральные трубопроводы*. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 52 с.
8. Zotsenko M. *Evaluation of Failure Probability of Soil Cushions* / M. Zotsenko, Y. Vynnykov, M. Kharchenko // *Geotechnical Safety and Risk: Proc. of the 3rd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR 2011)*. – Germany: Munich. – 2011. – P. 249 – 257.
9. Винников Ю.Л. *Исследования геотехнических свойств уплотненных малосвязанных грунтов насыпей* / Ю.Л. Винников, М.А. Харченко, Р.Н. Лопан // *Сб. тр. IV Междунар. симпозиума «Превентивные геотехнические меры по уменьшению природных и техногенных бедствий»*. – Хабаровск: ДВГУПС, 2011. – С. 372 – 377.
10. Вентцель Е.С. *Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. Учеб. пособие для вузов* / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Высш. шк., 2000. – 383 с.
11. Klebaner, F.C. *Introduction to Stochastic Calculus With Applications* / F.C. Klebaner. – Imperial College Press. – 2005. – 432 p.
12. EN 1993-4-3 (2007) (English): *Eurocode 3: Design of steel structures – Part 4 – 3: Pipelines* [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]. – 44 p.

Надійшла до редакції 11.04.2014
©С.Ф. Пічугін, П.Ю. Винников