

А.П. ОЛІЙНИК, Г.В. ГРИГОРЧУК, О.І. КЛАПОУЩАК, Л.І. ФЕШАНИЧ
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ОЦІНКА ДОВГОВІЧНОСТІ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДАНИМИ ПРО ПЕРЕМІЩЕННЯ ТОЧОК ЇХ ПОВЕРХНІ

Для оцінки реального технічного стану діючих магістральних та технологічних трубопроводів, циліндрично-оберткових об'єктів вивчається питання оцінки технічного ресурсу з урахуванням термінів експлуатації об'єктів, режимів дії на них силових факторів різної природи, які обумовлюють зміну несучої здатності об'єктів. Запропоновано розрахункову схему для оцінки довговічності технологічних оберткових об'єктів з використанням статистичного критерію, а також спосіб визначення зміни напружено-деформованого стану вказаних об'єктів. Реалізовано методіку перевірки гіпотези про нормальний закон розподілу випадкової величини – зміни напруженого стану об'єкта дослідження.

Ключові слова: оберткові об'єкти, зміни напружень, компонент тензора напружень, значення квантилі, амплітуди вібрації, вібронантаження, термін експлуатації.

A.P. OLIYNYK, G.V. GRYGORCHUK, O.I. KLAPOUSHCHAK, L.I. FESHANYCH
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

EVALUATION OF THE DURABILITY OF OBJECTS ACCORDING TO DATA ON THE DISPLACEMENT OF POINTS OF THEIR SURFACE

In order to evaluate the actual technical condition of existing main and technological pipelines, cylindrical - rotating objects, the issue of technical resource evaluation is considered taking into account the life of the objects, the modes of action on them of force factors of different nature, which cause changes in the bearing capacity of the objects. In doing so, statistical approaches that provide additional information about the loading of the investigated object, the presence of periodic loads are used. For this purpose, the components that characterize the change in stresses of the deformed state are studied. To determine the structures durability, it is necessary to determine whether the law of change of stresses obeys the normal law of distribution. This selects those sectors on a cylindrical object where the stress change is maximum. It is potentially possible to control the process of changing voltages at each point in the grid, but in this case there is a need to deal with large amounts of computation. A calculation scheme is proposed for estimating the durability of technological rotating objects using a statistical criterion, as well as a method for determining the change in the stress-strain state of these objects. The method of testing the hypothesis about the normal law of distribution of random value – change of the stress state of the object of study is implemented. The directions of further researches are determined, which should include determination of physical and mechanical characteristics of material of technological pipelines; determination of statistical characteristics of modes of vibration or change of loads; implementation of known methods of measuring the displacement of surface points for the purpose of the law of motion; experimental and theoretical determination of the unknown characteristics of the materials from which the elements of the design of technological rotary objects are made.

Keywords: rotating objects, voltage changes, stress tensor component, quantile values, vibration amplitudes, vibration loads, service life.

Вступ

Під час оцінки реального технічного стану діючих магістральних та технологічних трубопроводів, циліндрично-оберткових об'єктів, елементів конструкції газоперекачувальних агрегатів виникає питання оцінки технічного ресурсу з урахуванням термінів експлуатації об'єктів, режимів дії на них силових факторів різної природи, які обумовлюють зміну несучої здатності об'єктів. Питання такого роду вивчалось багатьма авторами [1, 2, 5, 6]. Як правило, задача оцінки терміну експлуатації об'єкта з математичної точки зору є некоректною через достатньо наближений характер задання початкових умов, тому необхідно робити додаткові допущення про характер діючих на об'єкт навантажень, врахувати особливості геометричної конфігурації, періодичність дії часових впливів. При цьому необхідно використовувати статистичні підходи [2], які передбачають наявність деякої додаткової інформації про способи навантаження об'єкта, що досліджується, а також навантажень, що мають періодичний характер.

Розглядається випадок, коли відомим є процес зміни напружень в часі, що моделюються згідно з розробленими в [7] моделями. Для цього використаємо найбільш поширений метод розроблений Болотніним В.В. і відображений в роботі [2], згідно з яким у випадку, коли випадковий процес зміни напружень підпорядковується нормальному закону розподілу, формула очікуваного терміну служби має наступний вигляд:

$$t_n = \frac{N_1 t_1 x_0^m}{F} \quad (1)$$

де

$$F = \sum_{n=0}^m C_m^n (\psi \alpha_1)^n \psi^{(m-n+2)} P[(x_0 - \psi \alpha_1)^2, m-n+2], \quad (2)$$

C_m^n – число комбінацій з m елементів по n ;

t_1 – ефективний період пульсацій напружень;

$$x_1 = \frac{\langle s \rangle}{s\sigma}; \quad x_0 = \frac{\sigma_2}{s\sigma};$$

$$\psi(n) - \text{масштабний множник: } \psi(n) = 2^{\frac{n-2}{2}} \cdot \Gamma\left(\frac{n}{2}\right);$$

$\Gamma(\alpha)$ – гамма функція [3]:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx, \quad (3)$$

причому якщо α – непарне ціле число, то $\psi(\alpha) = (\alpha-2)! \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}}$, якщо α – парне, то $\psi(\alpha) = 2^{\frac{\alpha-2}{2}} \cdot \left(\frac{\alpha-2}{2}\right)!$ [2];

$P_{\chi^2}(x_0, m_1 + 2)$ – функція χ^2 – розподілу Пірсона;

N_1, m_1, σ_2, ψ – відомі характеристики матеріалу;

S_{σ} – інтенсивність пульсацій напружень;

для функції $P_{\chi^2}(x_0, \nu)$ відома форма подання [4]:

$$P_{\chi^2}(x_0, \nu) = k \cdot e^{-\frac{x_0}{2}} \cdot \frac{\nu-1}{x_0^2}, \quad x_0 \geq 0, \quad (4)$$

де k – нормований множник, який забезпечує виконання рівності:

$$\int_0^{\infty} P_{\chi^2}(x_0; \nu) dx_0 = 1 \quad (5)$$

Табличні значення квантил можна знайти, наприклад, в роботі [1]. Зокрема, за даними досліджень труб, що використовується в магістральних трубопроводах, приймається $S_{\sigma} = 12 \div 14$ МПа, $\langle \sigma \rangle = 180 - 190$ МПа; $t = 1 \div 2$ с; $N_1 = 10^7$; $m = 6$, $\psi = 0,17$ і $\sigma_2 = 140$ МПа, при цьому $t_1 \approx 10^6$ год. Підходи, що використовуються в [7, 8], дозволяють на основі інформації про переміщення певної множини точок поверхні досліджуваного тіла встановити закон руху кожної точки досліджуваного трубопроводу у вигляді:

$$\vec{r}(s, \varphi, r, t) = \vec{r}_1(s, \varphi, r, t) - R\vec{n}_1 + \rho(s, \varphi, r, t) [\cos \omega(s, \varphi, r, t) \cdot \sin \omega(s, \varphi, r, t) \vec{n}_1] + \psi(s, \varphi, r, t) \vec{L}_1 \quad (6)$$

де $\rho(s, \varphi, r, t), \omega(s, \varphi, r, t), \psi(s, \varphi, r, t)$ – функції, які характеризують переміщення точок досліджуваного тіла в радіальному, поперечному та поздовжньому напрямках при різних компоновках досліджуваної ділянки трубопроводу (рис. 1) – ділянки I та III – прямолінійні, II – тороподібна, IV – конічна; змінні s, φ, r – пов'язані з криволінійно-циліндричною системою координат: s – координата вздовж осі тіла, $0 \leq \varphi \leq L$;

φ – координата по полярному куту, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$;

r – координата по радіусу трубопроводу, $R_{вн} \leq r \leq R_3$, $R_{вн}$ – внутрішній; R_3 – зовнішній радіуси труби,

$\vec{r}_1, \vec{n}_1, \vec{L}_1$ – компоненти нормалі, бінормалі та дотичної в досліджуваній точці тіла.

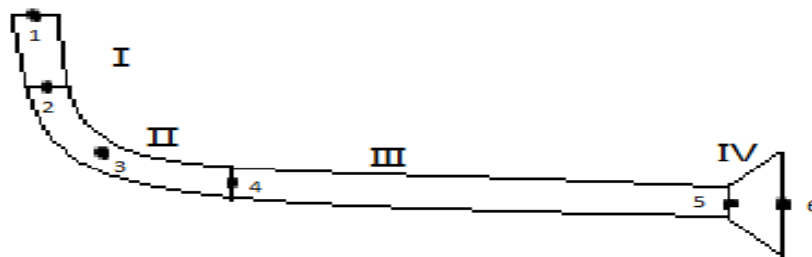


Рис. 1. Комплексна компоновка ділянки трубопроводу

Подання (6) є справедливим для квазіпрямолінійної, тороподібної та конічної ділянки об'єктів. На рис. 1 показано схему розміщення точок, в яких необхідно проводити вимірювання напружень з метою оцінки параметрів довговічності. В роботах [7, 8, 10–13] наводяться вказані подання для конічних та тороподібних ділянок трубопроводів, які використовуються в різних промислових системах. Подання виду (6) дозволяє провести розрахунок зміни напружено-деформованого стану досліджуваних об'єктів в рамках моделі крупно-деформованого ізотропного або анізотропного тіла за формулами [7]:

- для компонент тензора деформацій:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (\nabla_i \omega_j + \nabla_j \omega_i), \quad (7)$$

де ω_i – компоненти вектора переміщень, пораховані за (6);
 ∇_i – оператор коваріантного диференціювання у відповідній системі координат (декартовій, циліндричній, конічній, тороподібній) [7–13];
 - для компонент тензора напружень (ізотропна модель):

$$\sigma^{ij} = \lambda I_1(\varepsilon_{ij}) g^{ij} + 2\mu \varepsilon^{ij}, \quad (8)$$

де $\sigma^{ij}, \varepsilon^{ij}$ – контраваріантні компоненти тензора деформацій та напружень;
 s, φ, r – псевдополярні координати,
 $I_1(\varepsilon_{ij})$ – перший інваріант тензора деформації:

$$I_1(\varepsilon_{ij}) = \sum_{ij=1}^3 \varepsilon^{ij} g^{ij}, \quad (9)$$

g^{ij} – контраваріантні компоненти метричного тензора відповідної криволінійної системи координат;

λ і μ – параметри Ламе матеріалу, з якого виготовлено досліджуване тіло, вони зв'язані з модулем Юнга E та коефіцієнтом Пуассона матеріалу σ залежностями:

$$\mu = \frac{E}{2(\sigma+1)} \text{ і } \lambda = \frac{E\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} \quad (10)$$

для компонент тензора напружень (анізотропна модель):

$$\sigma_{ij} = \sum_{k,l=1}^3 C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (11)$$

де C_{ijkl} – компоненти тензора пружних модулів, між коваріантними та контраваріантними компонентами тензора існує взаємозв'язок:

$$\varepsilon^{kl} = \sum_{ij=1}^3 \varepsilon_{ij} g^{ik} g^{jl}. \quad (12)$$

Таким чином, компоненти, які характеризують зміну напружень деформованого стану, визначаються за (6)–(12).



Рис. 2. Зміна напружень по перерізах модельної ділянки трубопроводу

Для застосування запропонованої методики (1)–(5) визначення довговічності конструкцій необхідно визначити, чи підпорядковується закон зміни напружень нормальному закону розподілу. При цьому вибираються ті сектори на технологічному трубопроводі, на яких зміна напружень є максимальними (рис. 2). Потенційно можливо контролювати процес зміни напружень в кожній точці розрахункової сітки, але в такому випадку виникає необхідність мати справу зі значними об'ємами обчислень. В тому випадку, коли конструкція зазнає дії вібронавантажень або інших навантажень періодичного характеру, закон (6) будується по максимальним амплітудам вібрації, визначених експериментально. Тому в контрольних (7) точках визначаються значення напружень. Одержується вибірка значень напружень $\sigma_{ij}^0(A_k)$ в точках A_k , яка групується за інтервалами:

Перевірка гіпотези про те, що вказана вибірка підлягає нормальному закону розподілу, проводиться за критерієм χ^2 наступним чином:

1. Визначаються середини відрізків інтервалів:

$$x_{\alpha} = \frac{1}{2} \left[\sigma_{ij}^{\alpha-1}; \sigma_{ij}^{\alpha} \right], \quad (12)$$

$\alpha = 1, \dots, k$, k – кількість інтервалів розбиття.

Таблиця 1

Групування по інтервалах

Інтервал	Частота	Теоретична частота
$\left[\sigma_{ij}^0; \sigma_{ij}^1 \right]$	n_1	n_1^T
$\left[\sigma_{ij}^1; \sigma_{ij}^2 \right]$	n_2	n_2^T
$\left[\sigma_{ij}^2; \sigma_{ij}^3 \right]$	n_3	n_3^T
...
$\left[\sigma_{ij}^{k-2}; \sigma_{ij}^{k-1} \right]$	n_{k-1}	n_{k-1}^T
$\left[\sigma_{ij}^{k-1}; \sigma_{ij}^k \right]$	n_k	n_k^T

2. Обчислюється вибіркове середнє та дисперсія:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^k x_{\alpha} n_{\alpha} \quad (13)$$

$$n = \sum_{\alpha=1}^k n_{\alpha} \quad (14)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{\alpha=1}^k (x_{\alpha} - \bar{x})^2 \quad (15)$$

Теоретичні частоти Π_{α}^T визначаються наступним чином:
визначаються межі інтегрування:

$$\beta = \frac{\sigma_{ij}^{\alpha-1} - x_{\alpha}}{S}; \quad \gamma = \frac{\sigma_{ij}^{\alpha} - x_{\alpha}}{S} \quad (16)$$

після чого знаходиться теоретична ймовірність:

$$P_{\alpha} = \int_{\beta}^{\gamma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (17)$$

за таблицями інтеграла Ейлера [4]. Тоді

$$\Pi_{\alpha}^T = n P_{\alpha} \quad (18)$$

Якість результатів, одержаних за критерієм Пірсона, вважається прийнятною, якщо $n \geq 5$. В разі потреби, деякі інтервали об'єднуються (як правило, кратні). Обчислюються значення

$$\chi_{\beta}^2 = \sum_{\alpha=1}^k \frac{(n_{\alpha} - n P_{\alpha})^2}{n P_{\alpha}} \quad (19)$$

та χ_T^2 , яке визначається з таблиць χ^2 для параметрів: квантиль 0.95; кількість ступенів свободи $m = k - l - 1$, де l – кількість параметрів нормального закону; $l = r$; k – кількість інтервалів після об'єднання неінформативних; $\chi_{0.95}^2(m)$ визначається з таблиць χ^2 [4]. Якщо

$$\chi_{\beta}^2 < \chi_T^2(m), \quad (20)$$

то гіпотеза про нормальний закон генеральної сукупності напружень узгоджується з емпіричними даними вибірки з ймовірністю 0,95. З такою ж ймовірністю буде достовірним значення t_n в (1). Якщо ж умова (20) не виконується, то можливі два варіанти: 1) збільшення об'єму вибірки n ; 2) використання одержаних результатів з урахуванням того факту, що t_n визначається з ймовірністю меншою за 0.95, при цьому весь алгоритм розрахунку можна повторити для значень квантилі, меншою за 0.95.

Висновки

За результатами моделювання зміни напружено-деформованого стану діючих магістральних та технологічних трубопроводів, циліндрично-обертючих об'єктів, елементів конструкції ГПА, проведеного на основі результатів роботи [7] запропоновано вирішення питання оцінки технічного ресурсу з

урахуванням термінів експлуатації об'єктів, режимів дії на них силових факторів різної природи, які обумовлюють зміну несучої здатності об'єктів. Розроблена методика дозволяє визначати параметри довговічності об'єктів, які тривалий час експлуатуються, періодично проводячи оцінку довговічності з метою врахування значення діючих змін напружень неперспективного характеру – зміщення осей об'єктів, зміна режимів та умов експлуатації, зміна властивостей матеріалу. При цьому необхідно також періодично оцінювати значення параметрів, які вносять в методику (1)–(5) для корекції початкових значень параметрів довговічності з урахуванням особливостей процесу експлуатації та конструктивних особливостей досліджуваних технічних систем.

Напрямки подальшого дослідження можуть бути визначені наступним чином:

- визначення фізико-механічних характеристик матеріалу технологічних трубопроводів та циліндрично-обертвових об'єктів в кожний контрольний момент часу;
- визначення статистичних характеристик режимів вібрації або зміни навантажень, обумовлених зміною режимів та умов технічної експлуатації об'єктів;
- реалізація відомих апаратних методик періодичних вимірювань переміщень точок поверхні з метою побудови (6) та урахування особливостей геометрії об'єкта;
- експериментально-теоретичного визначення відомих характеристик матеріалів, з яких виготовлено технологічні трубопроводи та циліндрично-обертвові об'єкти з урахуванням їх змін внаслідок втоми матеріалу.

Література

1. Харионовский В. В. Повышение прочности газопроводов в сложных условиях / В. В. Харионовский. – Л. : Надра, 1990. – 180 с.
2. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В. В. Болотин. – М. : Машиностроение, 1984. – 321 с.
3. Зорич В. А. Математический анализ / В. А. Зорич. – М. : Наука, 1984. – 640 с.
4. Свердан П.П. Вища математика (Математичний аналіз і теорія ймовірностей) / П. П. Свердан. – Знання, 2008. – 450 с.
5. Вислобіцький П. А. Розрахунки граничних станів колон труб та трубопроводів / П.А. Вислобіцький. – К. : Логос, 1997. – 364 с.
6. Работоспособность трубопроводов / Е. Е. Зорин, Г. А. Ланчанов, А. Н. Степаненко, А. В. Шибнев. – М. : Сопrotивляемость разрушений. – 350 с.
7. Олійник А. П. Математичні моделі процесу квазістационарного деформування трубопровідних та промислових систем при зміні їх просторової конфігурації / А. П. Олійник. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2010. – 320 с.
8. Победря Б. Е. Лекции по тензорному анализу / Б. Е. Победря. – М. : Из-во Московского университета, 1986. – 264 с.
9. Седов Л. И. Механика сплошных сред / Л. И. Седов. – М. : Наука, 1984. – Т. 2. – 572 с.
10. Тимошенко С. П. Теория упругости / С. П. Тимошенко. – М. : Наука, 1975. – 576 с.
11. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики : учебное пособие / Г. И. Марчук. – М. : Наука, 1989. – 608 с.
12. Clapham L. Origin of a magnetic easy axis in pipeline steel / L. Clapham, C. Heald, T. Krause // J. Appl. Phys. – 1999. – Vol. 86. – № 36. – P. 1574–1580.
13. Cline A.K. Scalar and Planar Valued Curve Fitting Using Splines Under Tension / A.K. Cline // Communications of the ACM. – V. 17. – № 4. – P. 218–228.

References

1. Harionovskij V. V. Povyshenie prochnosti gazoprovodov v slozhnyh usloviyah / V. V. Harionovskij. – L. : Nadra, 1990. – 180 s.
2. Bolotin V. V. Prognozirovanie resursa mashin i konstrukcij / V. V. Bolotin. – M. : Mashinostroenie, 1984. – 321s.
3. Zorich V. A. Matematicheskij analiz / V. A. Zorich. – M. : Nauka, 1984. – 640 s.
4. Sverdan P.P. Vyshcha matematyka (Matematychnyi analiz i teoriia ymovirnostei) / P. P. Sverdan. – Znannia, 2008. – 450 s.
5. Vyslobitskyi P. A. Rozrakhunky hranychnykh staniv kolon trub ta truboprovodiv / P.A. Vyslobitskyi. – K. : Lohos, 1997. – 364 s.
6. Rabotosposobnost truboprovodov / E. E. Zorin, G. A. Lanchanov, A. N. Stepanenko, A. V. Shibnev. – M. : Soprotivlyaemost rozrushenij. – 350 s.
7. Oliinyk A. P. Matematychni modeli protsesu kvazistatsionarnoho deformuvannia truboprovodnykh ta promyslovykh system pry zmini yikh prostоровoi konfigurationsii / A. P. Oliinyk. – Ivano-Frankivsk : IFNTUNH, 2010. – 320 s.
8. Pobedrya B. E. Lekcii po tenzornomu analizu / B. E. Pobedrya. – M. : Iz-vo Moskovskogo universiteta, 1986. – 264 s.
9. Sedov L. I. Mehanika sploshnyh sred / L. I. Sedov. – M. : Nauka, 1984. – T. 2. – 572 s.
10. Timoshenko S. P. Teoriya uprugosti / S. P. Timoshenko. – M. : Nauka, 1975. – 576 s.
11. Marchuk G. I. Metody vychislitelnoj matematiki : uchebnoe posobie / G. I. Marchuk. – M. : Nauka, 1989. – 608 s.
12. Clapham L. Origin of a magnetic easy axis in pipeline steel / L. Clapham, C. Heald, T. Krause // J. Appl. Phys. – 1999. – Vol. 86. – № 36. – R. 1574–1580.
13. Cline A.K. Scalar and Planar Valued Curve Fitting Using Splines Under Tension / A.K. Cline // Communications of the ACM. – V. 17. – № 4. – R. 218–228.

Рецензія/Peer review : 04.05.2020 р. Надрукована/Printed : 16.6.2020 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Заміховський Л.М.