

МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 622.692.4

ОЦІНКА КОМБІНОВАНОГО ВПЛИВУ ВНУТРІШНЬОГО ТИСКУ, КРУЧЕННЯ ТА ДЕФОРМАЦІЇ ОСІ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТРУБОПРОВОДУ

© Олійник А.П., Гураль І.М., 2007

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Розглянуто модель процесу деформування ділянки трубопроводу з урахуванням комбінованого впливу внутрішнього тиску, кручення та деформації осі, запропоновано методику побудови функції геометрії досліджуваних ділянок з урахуванням дії вказаних факторів. Подано закон зміни координат точок ділянки, з його використанням проведено розрахунок напружено-деформованого стану модельної ділянки трубопроводу. Наведено порівняння результатів тестових розрахунків з даними інших авторів, оцінено вплив кожного з діючих силових факторів на технічний стан об'єкту

Технічний стан трубопроводу обумовлює його стабільне функціонування, економічну ефективність та екологічну безпеку. Одним з основних параметрів технічного стану є його напружено-деформований стан, оскільки він може змінюватись в процесі функціонування трубопроводу, причому сили та навантаження, які обумовлюють цю зміну, як правило є невідомими за абсолютною величиною та місцем прикладання до трубопроводу. Крім того, часто є невідомою сама фізична природа вказаних сил.

Однією з основних характеристик діючих трубопроводів є їх реальна просторова конфігурація, яка є змінною в часі величиною. Для будь-якої ділянки трубопроводу, яка зазнає переміщень, непередбачених нормативною документацією, достовірна інформація про зміну напружено-деформованого стану є важливою для прийняття рішень стосовно подальшої експлуатації, вибору стратегії проведення ремонтних робіт.

Актуальним залишається питання оцінки допустимої величини внутрішнього тиску в магістральному трубопроводі, який зазнає переміщень внаслідок дії неформалізованих силових факторів, оскільки картини розподілу напружень в прямолінійній трубі та в трубі з деформованою віссю є різними. Методика розв'язання оберненої задачі відновлення напружено-деформованого стану трубопроводу за відомими переміщеннями точок поверхні розроблена в роботі [1]. При цьому використовується подання закону руху трубопроводу у такому вигляді:

$$\vec{r}(s, \varphi, r, t) = \vec{r}_e - R_2 \vec{n}_e + \rho(s, \varphi, r, t) \times \\ \times [\cos \omega(s, \varphi, r, t) \cdot \vec{b}_e + \sin \omega(s, \varphi, r, t) \cdot \vec{n}_e] + \\ + \psi(s, \varphi, r, t) \cdot \vec{\tau}_e, \quad (1)$$

де s, φ, r, t - координати точки у зв'язаній з досліджуваним тілом криволінійній системі координат та момент часу, в який проводиться дослідження напружено-деформованого стану; $0 \leq s \leq L$, L - довжина досліджуваної ділянки трубопроводу; $0 \leq \varphi \leq 2\pi$; $R_1 \leq r \leq R_2$, де R_1 та R_2 відповідно внутрішній та зовнішній радіуси трубопроводу; \vec{r}_e , \vec{n}_e , \vec{b}_e , $\vec{\tau}_e$ - радіус-вектор верхньої твірної трубопроводу, нормаль, бінормаль, та дотична до твірної; $\rho(s, \varphi, r, t)$, $\omega(s, \varphi, r, t)$, $\psi(s, \varphi, r, t)$ - функції, що характеризують радіальні, кутові та повздовжні переміщення точок контрольованої ділянки.

При оцінці напружено-деформованого стану об'єкта за відомими переміщеннями певної множини точок в роботах [2,3] найбільше уваги приділяється відновленню вектора \vec{r}_e , для чого використовується широкий клас інтерполяційних та апроксимаційних процедур [4]. Компоненти векторів \vec{n}_e , \vec{b}_e , $\vec{\tau}_e$ визначаються або за відомими формулами Френе-Серра [1], або за інформацією про просторову конфігурацію верхньої твірної трубопроводу. В такому випадку повздовжня координата пов'язаної з

тілом криволінійної системи координат вибирається вздовж верхньої твірної [5]. Важливим моментом при вивченні напружено-деформованого стану досліджуваних ділянок трубопроводів є те, що вектори \vec{n}_e , \vec{b}_e , $\vec{\tau}_e$ змінюються в процесі деформування, але, оскільки вказані вектори визначаються лише на верхній твірній трубопроводу, вважається, що їх компоненти залежать лише від координати s . Аналітична структура функцій $\rho(s, \varphi, r, t)$, $\omega(s, \varphi, r, t)$, $\psi(s, \varphi, r, t)$ або вважається заданою (наприклад, $\rho(s, \varphi, r, t) = r$, $\omega(s, \varphi, r, t) = \varphi$, $\psi(s, \varphi, r, t) = 0$, що відповідає випадку виконання гіпотези плоских перерізів), або задається в певній аналітичній формі з урахуванням фізичної картини процесу і її точна форма повинна бути визначена в процесі розв'язку задачі, що призводить до необхідності вирішення задачі оптимізації функціоналу повної потенціальної енергії досліджуваного тіла шляхом знаходження мінімуму функції кількох змінних. При цьому в першому випадку визначаються тільки осьові напруження - компоненти тензора напружень $\sigma_{ij}, i = j, i = 1, 2, 3$. В роботі [5] враховано деформацію перерізів, обумовлену зміною кривизни осі трубопроводу шляхом подання функції $\rho(s, \varphi, r, t)$ у вигляді:

$$\rho_1(s, \varphi, r, t) = (r + \delta_i(r, s)) \sqrt{\sin^2 \varphi + k_j \cos^2 \varphi}, \quad (2)$$

де $j = 1; 2$, індекс „1” відповідає деформації по осі Oy , індекс „2” - деформації по осі Oz , $\delta_i(r, s)$ - параметр, що враховує зміну форми перерізу:

$$\delta_i(s, r) = m_j(r) x_i''(s), \quad (3)$$

де $x_1(s) = y(s)$, $x_2(s) = z(s)$. Параметри k_1 та k_2 визначаються з рівнянь, що встановлюють зв'язок між довжинами перерізів до та після деформації.

Проте вказані підходи не дозволяють оцінити комбінований вплив внутрішнього тиску та деформації осі на напружено-деформаційний стан трубопроводу. При визначенні координат точок на поверхні трубопроводу похибка вимірювань геодезичними методами складає 3-5мм, що дозволяє одержати задовільні з точки зору інженерних вимог до точності результати, оскільки для ділянки трубопроводу довжиною (100÷200)м (характерна довжина наземного переходу) переміщення можуть складати (10÷40)см і більше. Вимірювання переміщень проводиться геодезичними методами. В такому випадку апарат згладжуючих сплайнів [4] дозволяє ефективно ураховувати існуючу похибку вимірювання, розроблено методи оптимізації

процедури згладжування [6]. Дія внутрішнього тиску обумовлює радіальні переміщення $u(r)$ точок на поверхні трубопроводу, які обчислюються за відомими результатами задачі Ламе [7]:

$$u(r) = A \cdot r + \frac{B}{r}, \quad (4)$$

де

$$A = \frac{a^2 p_a - b^2 p_b}{2(\lambda + \mu)(b^2 - a^2)};$$

$$B = \frac{(p_a - p_b)a^2 b^2}{2(b^2 - a^2)\mu}, \quad (5)$$

a та b - внутрішній та зовнішній радіус труби; p_a та p_b - відповідно внутрішній та зовнішній тиски; λ та μ - параметри Ламе матеріалу трубопроводу, зв'язані з модулем Юнга та коефіцієнтом Пуасона матеріалу залежностями:

$$\lambda = \frac{\sigma E}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)};$$

$$\mu = \frac{E}{(1 + \sigma)}.$$

Тому для урахування дії внутрішнього тиску функція $\rho(s, \varphi, r, t)$, що характеризує радіальні переміщення точок трубопроводу в (1), записується у вигляді:

$$\rho(s, \varphi, r, t) = \rho_1(s, \varphi, r, t) + u(r). \quad (7)$$

Характерні величини $u(r)$ для реальних значень діючих тисків (1,0÷6,0)МПа мають порядки 10^{-4} м. Тому виникають проблеми їх вимірювання з достатньою точністю. В той же час використання залежностей (4)÷(7) є цілком вмотивованим, оскільки інформація про внутрішній тиск в трубопроводі визначається з використанням відповідної контрольно-вимірювальної апаратури, а зовнішній тиск приймається рівним атмосферному (в нормативних розрахунках величина атмосферного тиску приймається рівною нулю [8]).

В тих випадках, коли трубопровід зазнає дії крутного моменту M , кут закручування пов'язаний з крутним моментом наступним співвідношенням [7]:

$$\alpha = \frac{M}{\pi \mu (R_2^4 - R_1^4) / 2}. \quad (8)$$

В такому випадку функція $\omega(s, \varphi, r, t)$ може бути задана так:

$$\omega(s, \varphi, r, t) = \varphi + \frac{M}{\pi \mu (R_2^4 - R_1^4) / 2}. \quad (9)$$

Якщо величина M в залежності (9) є невідомою, зміна величини Φ визначається на основі вимірювань тривимірних переміщень точок на поверхні трубопроводу, причому ці точки вибираються не тільки вздовж верхньої твірної трубопроводу, але і на рівномірній сітці по координаті Φ в перерізах ділянки трубопроводу.

З урахуванням (9) та (7) закон руху (1) набуває вигляду:

$$\bar{r}(s, \varphi, r, t) = \bar{r}_e(s) - R_2 \bar{n}_e(s) + [\rho_1(s, \varphi, r, t) + u(r)] \times \left[\cos\left(\varphi + \frac{M}{\pi\mu/2 + (R_2^4 - R_1^4)}\right) \cdot \bar{b}_e(s) + \sin\left(\varphi + \frac{M}{\pi\mu(R_2^4 - R_1^4)/2}\right) \cdot \bar{n}_e(s) \right] + \psi(s, \varphi, r, t) \bar{t}_e(s). \quad (10)$$

У співвідношенні (10) функція $\psi(s, \varphi, r, t)$ визначає повздовжні переміщення точок. В тих випадках, коли приймається гіпотеза плоских перерізів $\psi(s, \varphi, r, t) = 0$. При оцінці впливу способу задання $\psi(s, \varphi, r, t)$ на точність виконання основних рівнянь механіки вибирається подання $\psi(s, \varphi, r, t)$ у вигляді:

$$\psi(s, \varphi, r, t) = C_1 r; \quad (11)$$

$$\psi(s, \varphi, r, t) = C_2 r^3. \quad (12)$$

Константи в формулах (11) та (12) є параметрами оптимізації за вказаним критерієм точності розв'язання задачі.

Наведений алгоритм оцінки напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів реалізовано як комплекс програм для розрахунку на ЕОМ, який передбачає модульну технологію розрахунків – дію кожного з описаних факторів можна враховувати як в комплексі, так і окремо.

Проведені тестові розрахунки дозволяють зробити наступні висновки.

1. Закон руху (10) дозволяє в одному розрахунку поєднувати величини різних порядків: для модельної ділянки трубопроводу довжиною 100м діаметром $D=1420$ мм з товщиною стінки $\delta=18$ мм при внутрішньому тиску 4,0 МПа значення кільцевих напружень для прямолинійної ділянки трубопроводу розраховувались за формулами:

$$\sigma_{\kappa\kappa} = pR_1/\delta \quad (13)$$

та за методикою згідно [1] з урахуванням (10). За формулою (13) $\sigma_{\kappa\kappa} = 209$ МПа, за методикою [1]

$\sigma_{\kappa\kappa} = 213$ МПа, тобто відхилення результатів складає 1,8%.

2. Розрахунки за методикою згідно [1] з урахуванням (10) проводились для деформованої труби, яка в початковий момент мала прямолинійну конфігурацію осі з тими ж характеристиками, що в п.1, а також згідно (13) та за відомими розрахунковими формулами задачі про балку на двох опорах, навантажену зосередженою силою P . Причому одна опора є шарнірно рухомою, а інша – шарнірно нерухомою [7]. При цьому використовувався принцип суперпозиції розв'язку задач згідно теорії пружності. Координати пружної лінії балки вводились як вихідні координати деформованої осі для розрахунку за методикою згідно [1] з урахуванням (10). Розраховані за вказаними двома методиками повздовжні та кільцеві напруження дають відхилення в результатах до 10%, причому вирішальний вклад вносить похибка інтерполяції деформованої осі.

3. Встановлено, що для досліджуваної ділянки трубопроводу довжиною 150 метрів без урахування дії внутрішнього тиску при переміщеннях точок ділянки (1÷10)см характер напружено-деформованого стану аналогічний до фізичної картини процесу деформування балки – в кожному перерізі є як зони стиску, так і розтягу, причому максимальні за модулем та різні за знаком напруження мало відрізняються за величиною модуля. При урахуванні дії внутрішнього тиску така картина напружено-деформованого стану змінюється: в залежності від величини внутрішнього тиску значення напружень стиску поступово зменшуються, а при досягненні певної величини (яка залежить від значень переміщень точок ділянки, виміряних експериментальним шляхом) конструкція зазнає виключно напружень розтягу (кільцевих та повздовжніх). Радіальні напруження суттєво менші за абсолютним значенням на (50÷70)%, що є характерним для задачі Ламе [7]. Якщо за критерій величини напружень, що діють в трубопроводі, взяти інтенсивності напружень, то встановлено, що значні значення максимальних кільцевих (150÷170)МПа та повздовжніх (120÷130)МПа не обумовлюють появи значних інтенсивностей напружень, які в точках максимальних напружень складають (50÷60)МПа. Така закономірність розподілу напружень в ділянці трубопроводу характерна для широкого класу ділянок, хоча кількісні характеристики результатів розрахунку напружено-деформованого стану залежать від довжини ділянки, величини переміщень точок її поверхні під дією силових факторів різної природи та від величини внутрішнього тиску.

4. Проведено модельні розрахунки напружено-деформованого стану ділянки трубопроводу з урахуванням діючих крутних моментів. Як правило, магістральні трубопроводи не зазнають дії крутних моментів, принаймні навантаження такого роду не

включено в число нормативних (постійних, тимчасових або короточасних [8]). Проте в складних умовах гірських ділянок, в зонах зсуву ґрунтів при умові, що одна з границь відкритої ділянки трубопроводу є жорстко закріпленою, а інша зазнає дії ґрунту, поява крутних моментів є цілком можливою. Тому корисними можуть бути наступні одержані результати: для суцільної труби з діаметром $D=1420\text{мм}$ під дією моментів максимальні допустимі напруження обчислюються за формулою[7]:

$$\tau_{\max}^c = \frac{2M}{\pi R^3}, \quad (14)$$

де $R = D/2$. Для тонкостінної труби з товщиною стінки $\delta = 16\text{мм}$:

$$\tau_{\max}^{TC} = \frac{2MR}{R^4 - (R - \delta)^4}. \quad (15)$$

Оцінюючи величину

$$K = \frac{\tau_{\max}^{TC}}{\tau_{\max}^c} = \frac{2MR}{R^4 - (R - \delta)^4} \cdot \frac{\pi R^3}{2M} = \frac{\pi R^4}{R^4 - (R - \delta)^4} \quad (16)$$

з наведеними даними, можна одержати ($R=0,71\text{м}$, $\delta=0,016\text{м}$), що

$$K = \frac{\pi}{1 - (1 - \delta/R)^4} \approx 36. \quad (17)$$

Таким чином, в тонкостінній трубі (якими є магістральні трубопроводи) поява крутних моментів призводить до виникнення значних зсувних напружень, які в 36 разів більші, ніж напруження, що виникають в суцільній трубі. В той же час необхідно зауважити, що крутні моменти не розглядаються в нормативних документах як небезпечні навантаження, оскільки в нормальних умовах експлуатації дія крутних моментів на трубопроводи або повністю виключена, або є незначною. В той же час, при дії екстремальних навантажень (рухи ґрунтів, паводки, підземні поштовхи тощо) поява факторів такого роду є цілком можливою.

Отже, можна зробити висновок про те, що використання залежностей (7), (9) та (10) дозволяє розширити можливості методики оцінки напружено-деформаційного стану магістральних трубопроводів з урахуванням комбінованої дії внутрішнього тиску, кручення та ефекту деформування осі під дією факторів різної силової природи. З точки зору практичного використання одержаних результатів корисним є можливість поєднання в єдиній методиці величин різних порядків, які характеризують переміщення точок поверхні в процесі деформування під дією силових факторів невідомої природи та під дією внутрішнього тиску. Встановлено, що дія пружних моментів обумовлює значний ріст зсувних

напружень в порівнянні з суцільними трубами (валами), проте на даний час важко оцінити величину діючих в процесі експлуатації на трубопроводи крутних моментів, які можуть виникати при дії на трубопроводи нерівномірно розподілених по довжині навантажень, дослідження в цьому напрямку може бути визначеним як напрямок преспективних досліджень.

1. Чекурін В.Ф., Олійник А.П. Некоректна задача відновлення напружено-деформованого стану криволінійних циліндричних тіл за відомими переміщеннями певної множини точок поверхні. - Крайові задачі термомеханіки : Зб. наук.пр.- К.: Ін-т математики НАН України, 1996, ч. II. – С.160-165. 2. Олійник А.П., Мартинюк Х.В., Гураль І.М. Оцінка впливу точності вимірювання переміщень точок поверхні на результати математичного моделювання напружено-деформаційного стану трубопроводів. // Фізика і хімія твердого тіла, т.7, №2(2006).-С.374-377. 3. Тимашев С.А., Яблонских И.Л. Экспертная система оценки риска эксплуатации линейной части магистральных трубопроводов.-VIII Международная деловая встреча „Диагностика-98”, ИРЦ „Газпром”, 1998.- С.156-161. 4. Панчук В.Г. Математична теорія експериментів в інженерній механіці. – Івано-Франківськ: Факел, 2002. -160с. 5. Олійник А.П. Математичне моделювання процесу деформування ділянки трубопроводу з урахуванням зміни форми перерізу. // „Науковий вісник” ІФНТУНГ, №3(9), 2004. –С.153-156. 6. Олійник А.П., Мартинюк Х.В. Математичне моделювання напружено-деформаційного стану ділянок трубопроводу з оптимізацією процедури зглажування початкових даних. // Методи та прилади контролю якості, №13, 2005. – С.21-25. 7. Седов Л.И. Механика сплошных сред. т. II – М.: Наука, 1984. – 560с. 8. СНиП 2.05.06 – 85. Магистральные трубопроводы // Минстрой России – М.: ГУП ЦПП, 1997. – 60с.

