МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ І ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

УДК 622.692.4

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ДЕФОРМУВАННЯ ДІЛЯНКИ ТРУБОПРОВОДУ З УРАХУВАННЯМ ЗМІНИ ФОРМИ ПЕРЕРІЗУ

А.П.Олійник

ІФНТУНГ, вул.Карпатська,15, Івано-Франківськ, 76019, e-mail: dnol@il.if.ua

Рассмотрена модель процесса деформирования участка трубопровода с учетом изменения конфигурации его оси, предложена методика расчета компонент тензоров деформаций и напряжений с учетом эллиптичности сечения, в которой реализуется процедура оптимизации модели процесса по критерию выполнения уравнений равновесия участка. Дан анализ результатов тестовых расчетов, проведено сравнение результатов с данными других авторов

The model pipeline's section deformation process is considered taking to account the axis configuration change, the calculation method for the deformation and stress tensor components is suggested, in which the procedure of model optimization is realized using the sections equilibrum equations carrying out criterion. The analysis of results is given taking to consideration the tested calculation data, the comparison of different author's results is presented

У ході оцінки технічного стану магістральних трубопроводів важливого значення набуває визначення напружено-деформованого стану його лінійної частини, яка зазнає дії різних силових чинників, причому кількісні характеристики вказаних факторів залишаються невідомими. На основі експериментальних досліджень вдається виявити, що в процесі експлуатації ділянки трубопроводів зазнають переміщень, які можна вважати квазістаціонарними. Проблема оцінки напружено-деформованого стану трубопроводу за відомими переміщеннями дискретної множини точок його осі досліджувались багатьма авторами [1-3], при цьому інформацією про зміну напружень є значення компонент тензора напружень $\sigma_{ii}, i = 1,2,3$, тобто, осьових напружень, а в тих випадках, коли розглядаються і зсувні напруження $\sigma_{ij}, i \neq j$, для побудови моделі процесу деформування труби використовується додаткова інформація про тип навантажень, яких зазнає трубопровід [4]. Ідеологія оцінки напружено-деформованого стану трубопроводів за відомими переміщеннями точок його осі, запропонована в [3], у ході реалізації якої основними характеристиками трубопроводу, що моделюються, є його геометричні характеристики. Їх зміна в процесі експлуатації потребує додаткової інформації про функції, що характеризують деформацію перерізів трубопроводів. Виникає завдання щодо моделювання процесу деформування трубопроводу за відомими переміщеннями точок його осі, при цьому необхідно встановити, як деформація осі впливає на деформацію перерізу трубопроводу, як змінюються при цьому значення діючих у трубопроводах напружень та наскільки адекватною є розроблена модель реальній фізичній картині процесу.

Для побудови моделі зробимо припущення про те, що досліджуване тіло можна розглядати як пружнодеформоване, а перерізи трубопроводу, що були плоскими до деформації, залишаються плоскими і після деформації осі. Нехай у два моменти часу задано координати будь-якої точки досліджуваного об'єкта, тобто, побудовано його тривимірну параметризацію. При цьому окремо розглядаються переміщення вздовж осі Oy та Oz. У початковий момент тіло моделюється у вигляді циліндра з заданою довжиною та товщиною стінки

$$\vec{r}_0 = \begin{cases} x = s & 0 \le s \le L, \\ y = r\cos\varphi & 0 \le \varphi \le 2\pi, \\ z = r\sin\varphi & R_{вн} \le z \le R_з, \end{cases} \quad (1)$$

де: s, r, φ – циліндричні координати; L – довжина, $R_{вн}$, $R_з$ – внутрішній та зовнішній радіуси трубопроводу. У контрольний момент часу для параметризації ділянки маємо такі співвідношення: якщо тіло зазнає переміщень осі лише в напрямку координатної осі Oy, то радіус-вектор кожної точки задається таким чином:

$$\vec{r}_y = \begin{cases} x = s - \rho_y \cos\varphi \cdot \dfrac{y'}{\sqrt{1+y'^2}} \\ y = y(s) + \rho_y \cos\varphi \cdot \dfrac{1}{\sqrt{1+y'^2}} \\ z = \rho_y \sin\varphi, \end{cases} \quad (2)$$

а у випадку переміщень вздовж осі Oz радіус-вектор кожної точки записується у вигляді

$$\vec{r}_z = \begin{cases} x = s - \rho_z \sin\varphi \cdot \dfrac{z'}{\sqrt{1+z'^2}} \\ y = \rho_z \cos\varphi \\ z = z(s) + \rho_z \sin\varphi \cdot \dfrac{1}{\sqrt{1+z'^2}}, \end{cases} \quad (3)$$

де: y(s); z(s) – координати точок осі трубопроводу, які визначаються за відомими значеннями координат вузлових точок на осі шляхом побудови інтерполяційного згладжую чого сплайну; $y'(s);z'(s)$ - похідні сплайну; функції ρ_y, ρ_z характеризують зміну форми перерізу трубопроводу в процесі деформування його осі. Вказані функції задаються у вигляді

$$\rho_y = (r + \delta_y(r,s))\sqrt{\sin^2\varphi + k_y^2\cos^2\varphi}, \quad (4)$$

$$\rho_z = (r + \delta_z(r,s))\sqrt{k_z^2\sin^2\varphi + \cos^2\varphi}, \quad (5)$$

причому

$$\delta_y(r,s) = m_y(r)y''(s); \quad (6)$$

$$\delta_z(r,s) = m_z(r)z''(s), \quad (7)$$

тобто: величини $\delta_y(r,s)$ та $\delta_z(r,s)$приймаються пропорційними другим похідним функцій y(s) та z(s), тобто, кривинам осі при деформуванні по відповідних осях. Функції $\delta_y(r,s)$ та $\delta_z(r,s)$ мало змінюються по радіусу, а для практичних розрахунків використовуються лише значення $\delta_y(R_з,s)$ та $\delta_z(R_з,s)$, а значення коефіцієнта пропорційності в (6),(7) має значення порядку 10^{-3}. Якщо ввести позначення

$\delta_{1y} = \delta_y(R_з,s); \delta_{2y} = \delta_y(R_{вн},s); \delta_{1z} =$

$= \delta_z(R_з,s); \delta_{1z} = \delta_z(R_{вн},s),$

то

$$\delta_y(r,s) = \frac{\delta_{1y} - \delta_{2y}}{R_з - R_{вн}}(r - R_{вн}) + \delta_{2y}, \quad (8)$$

$$\delta_z(r,s) = \frac{\delta_{1z} - \delta_{2z}}{R_з - R_{вн}}(r - R_{вн}) + \delta_{2z}. \quad (9)$$

Параметри K_y та K_z визначаються з рівнянь, які встановлюють зв'язок між довжинами перерізів до та після деформацій

$$\int_0^{2\pi}\sqrt{K_y^2\sin^2\varphi + \cos^2\varphi}\,d\varphi = \frac{2\pi R_з}{R_з + \delta_{1y}}; \quad (10)$$

$$\int_0^{2\pi}\sqrt{K_z^2\cos^2\varphi + \sin^2\varphi}\,d\varphi = \frac{2\pi R_з}{R_з + \delta_{1z}}. \quad (11)$$

Рівняння (10), (11) записані для зовнішньої поверхні перерізу трубопроводу з припущення , що довжина перерізу не змінюється. Якщо вказана модель не відповідає реальній картині процесу, то у праві частини рівнянь (10) та (11) вводяться додаткові множники $p_y = 1 + \varepsilon_y$; $p_z = 1 + \varepsilon_z$, де величини ε_y та ε_z характеризують видовження або стиснення перерізу. Розв'язання рівнянь (10) та (11) відносно K_y та K_z проводяться числовим способом з використанням методу хорд для знаходження коренів нелінійних алгебраїчних рівнянь [5], оскільки інтеграли в лівій частині рівнянь (10), (11) є еліптичними і в елементарних функціях не підлягають визначенню. Такий вибір методу пошуку кореня обґрунтовується тим, що обчислення похідних інтегралів в лівій частині (10) та (11) потребує додаткових умов на підінтегральну функцію.

Процедура подальшого розв'язку задачі передбачає реалізацію таких етапів:

1. За відомими координатами $\vec{r}_0; \vec{r}_y; \vec{r}_z$, які визначаються співвідношеннями (1), (2), (3), знаходяться компоненти векторів

$$\vec{э}_i^{\,0} = \frac{\partial\vec{r}_0}{\partial x_i}; \vec{э}_i^{\,y} = \frac{\partial\vec{r}_y}{\partial x_i}; \vec{э}_i^{\,z} = \frac{\partial\vec{r}_z}{\partial x_i}, \quad (12)$$

де $x_1 = s; x_2 = \varphi; x_3 = r$.

2. Знаходяться компоненти метричних тензорів

$$g_{ij}^{\,0} = \vec{э}_i^{\,0}\cdot\vec{э}_j^{\,0}; g_{ij}^{\,y} = \vec{э}_i^{\,y}\cdot\vec{э}_j^{\,y}; g_{ij}^{\,z} = \vec{э}_i^{\,z}\cdot\vec{э}_j^{\,z}. \quad (13)$$

3. За відомими компонентами метричних тензорів (13) знаходяться компоненти тензорів деформацій

$$\varepsilon_{ij}^y = \frac{1}{2}(g_{ij}^y - g_{ij}^0); \varepsilon_{ij}^z = \frac{1}{2}(g_{ij}^z - g_{ij}^0). \quad (14)$$

4. Знаходяться коваріантні та контраваріантні компоненти тензора напружень з використанням закону Гука для пружнодеформованого тіла, який для ізотропного тіла записується у формі:

- для коваріантних компонент

$$\sigma_{ij}^y = \lambda I_1(\varepsilon_y)g_{ij}^0 + 2\mu\varepsilon_{ij}^y; \sigma_{ij}^z = \lambda I_1(\varepsilon_z)g_{ij}^0 + 2\mu\varepsilon_{ij}^z; \quad (15)$$

- для контраваріантних компонент:

$$\sigma_y^{ij} = \lambda I_1(\varepsilon_y) g_{ij}^0 + 2\mu \sum_{\alpha=1}^{3}\sum_{\beta=1}^{3} g_{i\alpha}^0 g_{i\beta}^0 \varepsilon_{\alpha\beta}^y,$$
$$\sigma_z^{ij} = \lambda I_1(\varepsilon_z) g_{ij}^0 + 2\mu \sum_{\alpha=1}^{3}\sum_{\beta=1}^{3} g_{i\alpha}^0 g_{i\beta}^0 \varepsilon_{\alpha\beta}^z. \quad (16)$$

У формулах (15), (16) використовується величина першого інваріанта тензора деформацій, яка визначається за формулою

$$I_1(\varepsilon) = \sum_{i,j=1}^{3} \varepsilon_{ij} g_{ij}^0, \quad (17)$$

компоненти g_{ij}^0, що входять в (15), (16) є компонентами матриці, оберненої до матриці g_{ij}, яка обчислюється за (13), параметри λ та μ - параметри Ламе, які обчислюються за формулами

$$\mu = \frac{E}{2(\sigma+1)};\ \lambda = \frac{E\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}, \quad (18)$$

де E - модуль Юнга, σ - коефіцієнт Пуассона для трубопровідної сталі.

5. Після обчислення компонент тензора напружень з урахуванням квазістаціонарності процесу деформування перевіряється виконання умов рівноваги, які без урахування масових сил записуються у вигляді

$$\sum_{j=1}^{3} \nabla_j \sigma^{ij} = 0, \quad (19)$$

де ∇_j - оператор коваріантного диференціювання тензора σ^{ij}

$$\nabla_j \sigma^{jk} = \frac{\partial \sigma^{ik}}{\partial x_i} + \sum_{s=1}^{3} \sigma^{sk} \Gamma_{si}^{j} + \sum_{s=1}^{3} \sigma^{js} \Gamma_{si}^{k}, \quad (20)$$

Γ_{si}^k - символи Кристофеля II роду, які під час розв'язання даної задачі, розраховуються для циліндричної системи координат

$$\Gamma_{22}^3 = -r; \Gamma_{32}^2 = \Gamma_{23}^2 = \frac{1}{r}. \quad (21)$$

Такий підхід справедливий для пружних деформацій об'єкта.

Результатом розрахунків для компонент (16) співвідношень (19) є три рівняння, які повинні виконуватись для компонент σ_y^{ij} та σ_z^{ij}

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \sigma_k^{11}}{\partial s} = 0, \\ \dfrac{\partial \sigma_k^{22}}{\partial \varphi} + \dfrac{\partial \sigma_k^{33}}{\partial r} + \dfrac{3}{r}\sigma_k^{23} = 0, \\ \dfrac{\partial \sigma_k^{33}}{\partial \varphi} + \dfrac{\partial \sigma_k^{30}}{\partial r} - \sigma_k^{22}\cdot r + \dfrac{1}{r}\sigma_k^{33} = 0, \end{cases} \qquad k = y; z. \quad (22)$$

6. Для рівнянь системи (22) шляхом підстановки співвідношень (16) у (22) одержуємо функції $F_i(s,\varphi,r), i = 1,2,3$, які є нев'язками відповідно першого, другого та третього рівнянь системи (22).

7. Знаходимо величини

$$\Delta_i^k = \int_V F_i^k(s,\varphi,r)dV \approx$$
$$\approx \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N} \frac{\pi(R_з^2 - R_{вн}^2)}{MN} LF_i^k(s_j,\varphi_L,R_з), \quad (23)$$

де $k=y,z$; $I=1,2,3$; V - об'єм досліджуваного тіла; M, N - кількість точок розбиття тіла по повздовжній та полярній координаті, після чого розв'язуємо задачу мінімізації величини Δ_y та Δ_z

$$\Delta_y = \sqrt{\sum_{i=1}^{3}(\Delta_i^y)^2};\ \Delta_z = \sqrt{\sum_{i=1}^{3}(\Delta_i^z)^2}. \quad (24)$$

Для мінімізації величини в (24) використовується такий підхід: описаний алгоритм реалізується з припущенням $m_y(r) = const$; $m_z(r) = const$; у формулах (6) і (7).

У такому випадку задача зводиться до задачі одновимірної оптимізації табличної заданої функції, яка вирішується методом Фібоначчі, що дає змогу оптимізувати кількість розв'язків задачі для різних значень m_y та m_z з метою досягнення заданого рівня точності знаходження розв'язку задачі [6], що є особливо важливим для розв'язання даної задачі, оскільки один варіант задачі потребує 15-20 секунд машинного часу залежно від швидкодії ЕОМ та кількості розрахункових точок у моделі. Якщо одержані результати не задовольняють вимогам точності розв'язку задачі, то вказана процедура може проводитись для кожного перерізу або групи послідовних перерізів, при цьому задача мінімізації величин (24) вирішується для кожного доданка або групи доданків у (23).

8. Використовуючи принцип суперпозиції розв'язків задачі теорії пружності [7], можна остаточно записати вирази для компонент тензора напружень

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^y + \sigma_{ij}^z, \quad (25)$$

на основі яких проводяться обчислення всіх сил та навантажень, що діють на досліджуване тіло, приймається рішення стосовно продовження експлуатації ділянок трубопроводів або їх капітального ремонту.

На основі реалізації вказаного підходу до моделювання процесу деформування ділянки можна зробити такі висновки:

припущення про пропорційність між кривиною ділянки та ступенем еліптичності її перерізу є обґрунтованим, оскільки вдається визначити не тільки осьові, але й зсувні деформації та напруження досліджуваного тіла, тобто, одержати новий якісний ефект у моделі;

одержаний розв'язок постійно залежить від параметра еліптичності $\delta_y(r,s);\delta_z(r,s)$, за умови $\delta_y(r,s) = \delta_z(r,s) = 0$ одержані результати моделювання збігаються з відомими, наведеними в [3];

деформований переріз під час моделювання деформацій по осях O_z та O_y не має форми еліпса, а набуває більш складної просторової конфігурації, що узгоджується з результатами [4];

за результатами тестових розрахунків встановлено, що існують мінімуми величин (24); це дає підстави зробити висновок про те, що вказаний підхід дає можливість одержати результати моделювання, які є більш адекватними реальній фізичній картині процесу , оскільки точніше задовольняються умови (22), зменшення величин нев'язок $F_i(s,\varphi,r), i = 1,2,3$, з введенням еліптичного перерізу складає 50-80% порівняно з моделлю недеформованого плоского перерізу, порядок нев'язок у системі (22) збігається з величиною реальних масових сил, які діють на досліджувану ділянку.

Продовження роботи в напрямку реалізації вказаного підходу може бути пов'язане з вивченням інших моделей деформації перерізу, зокрема, з використанням інформації про координати точок базових перерізів та їх зміну в процесі експлуатації об'єкта, яка дасть змогу проаналізувати неплоскі деформації перерізів.

Література

1 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.

2 Седых А.Д., Дедиков Е.В., Харионовский В.В. и др. Методы оценки состояния трубопроводов по результатам диагностики. //Газовая промышленность. - №8. - С. 58-60.

3 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. Інститут математики НАНУраїни, 1996, ч.II – С. 160-165.

4 Білобран Б.С., Мельник Н.Б. Вплив сплющування на несучу здатність тонкостінних тру б під тиском при згині з розтягом (стиском). // Машинознавство. - 2002. - №5, С.17-21.

5 Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. – М.: Наука, 1989. – 432 с.

6 Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс. – М.: Радио и связь, 1988 – 128 с.

7 Седов Л.И. Механика сплошных сред. - М.: Наука. Т.2., 1984. - 560 с.

УДК 622.276.012.7

ВИКОРИСТАННЯ ОРТОГОНАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДУ АВТОМАТИЗОВАНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ШГНУ

О.В.Євчук
ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, au@ifdtung.if.ua

Предложены методы формирования вектора признаков при диагностировании ШГНУ методом распознавания образов с использованием преобразования Уолша-Адамара и вейвлет-преобразования, применение которых позволяет повысить достоверность диагностирования по сравнению с известными методами

The methods are offered for obtaining feature vector for pattern recognition in beam-pump diagnostics using Walsh-Hadamard transform and wavelet transform. The application of these methods allows to increase the reliability of diagnostics in comparison with known methods

Серед відомих на даний час методів діагностування штангових глибинно-насосних установок (ШГНУ) на основі динамометричної інформації ряд із них грунтується на виділенні так званих "характерних точок" на динамограмі, які визначають моменти переходу між фазами циклу гойдання ШГНУ (сприйняття навантаження – хід вгору – зняття навантаження – хід вниз). Така необхідність випливає з того, що характер зміни навантаження в суміжних фазах циклу є принципово відмінним, а наявність більшості дефектів спричиняє видиму суттєву зміну впродовж однієї фази, у зв'язку з чим для виявлення певного дефекту аналізу підлягає та частина динамограми, що відповідає такій фазі, наприклад, для дефекту "витік у нагнітальній частині" – лінія сприйняття навантаження, а для дефектів "витік у приймальній частині" або "відкачка з газом" – лінія зняття навантаження. Наступним кроком є обчислення деяких інформативних ознак:

а) умовне середнє навантаження, тангенси кутів сприйняття і зняття навантаження, коефіцієнти подачі і наповнення (метод напівавтоматичного розпізнавання несправностей [1]);

б) 12 коефіцієнтів параболічних кривих, якими апроксимуються чотири основні ділянки динамограми (метод автоматичного визначення несправностей [1]);