# МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ І ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

УДК 622.692.4

## МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТРУБОПРОВОДІВ ЗА ДАНИМИ ІНСПЕКЦІЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМИ ПОРШНЯМИ

***А.П.Олійник, Т.О.Болгаченко***

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 47246*
*e-mail: duol@il.if.ua*

*Розглянуто модель процесу деформування ділянки трубопроводу за результатами внутрішньотрубної інспекції інтелектуальними поршнями, запропоновано методику розрахунку компонент тензорів деформації та напружень з урахуванням реальної конфігурації перерізу та наявності вм'ятин на поверхні трубопроводу. Проаналізовано напруження, що виникають під дією внутрішнього та зовнішнього тисків, а також в результаті дії силових факторів невідомої природи. Дано аналіз результатів тестових розрахунків, проведено оцінку впливу точності вимірювань геометричних параметрів на результати розрахунків за запропонованою методикою.*

*Рассмотрена модель процесса деформирования участка трубопровода по результатам внутритрубной инспекции интеллектуальными поршнями, предложена методика расчета компонент тензоров деформаций и напряжений с учетом реальной конфигурации сечения и наличия вмятин на поверхности трубопровода. Проанализированы напряжения, возникающие под действием внутреннего и внешнего давлений, а также в результате действия силовых факторов неизвестной природы. Дан анализ результатов тестовых расчетов, произведена оценка влияния точности измерений геометрических параметров на результаты расчётов по предложенной методике.*

*The model pipeline's section deformation process is considered based on the intellectual piston (pigs) intratubal inspection results, the calculation method for the deformation and stress tensor components is suggested taking to account the section's real configuration and the pipeline's surface dent presence. The stresses, which are the result of inner and outside pressure action, the action of the force factors of cryptogenous, are analysed. The analysis of test calculation results is given, the geometrical parameters measurement accuracy influence on the suggested calculation method results estimation is made.*

Оцінка напружено-деформованого стану (НДС) магістральних трубопроводів є актуальним науково-технічним завданням, вирішення якого є особливо важливим в умовах діючого трубопроводу, для вирішення якої можна використати дані внутрішньої інспекції за допомогою апаратури, виробленої фірмою "ROZEN EUROPE B.V.", які характеризують зміну геометрії перерізів.

В роботі [1] на основі досвіду експлуатації інспекційних снарядів аналізуються можливості апаратури внутрішньо трубної інспекції трубопроводів. Діагностичні поршні XYZ-Mapping дозволяють проводити визначення трьохвимірних географічних координат з використанням внутрішнього навігаційного блоку одночасно з контролем внутрішньої геометрії трубопроводу, визначати деформації типу вм'ятин, овальностей, гофрів та їх геометричні характеристики. Існуючі системи обробки одержаної діагностичної інформації не передбачають одержання повної інформації про напружено-деформований стан досліджуваної ділянки, хоча вказана інформація дозволяє суттєво розширити можливості методики [2] оцінки визначення напружено-деформованого стану ділянки трубопроводу за відомими переміщеннями певної множини точок поверхні шляхом розрахунку шести компонент тензорів деформації та напружень, причому вказані точки вибирались, як правило, вздовж осі трубопроводу по верхній твірній. Використання діагностичних поршнів дозволяє одержати координати точок перерізів з певним кроком по полярному куту та оцінити їх переміщення. На основі цих даних в пропонованій роботі ставиться та вирішується задача розробки та програмної реалізації способу оцінки шести компонент тензора діючих механічних напружень та їх зміни в процесі експлуатації. .

Відомими є нормативні характеристики інтелектуальних поршні: крок вимірювання по осі трубопроводу – 2,5 мм, похибка вимірювання відстані по осі трубопроводу – 1 м на 1000 м дистанції (0,1%), при прив'язці до кільцевих швів (у випадку повторної діагностики тієї ж ділянки) – 0,1 м ( реально точність вища), точність вимірювання товщини стінки – 1 мм, похибка вимірювання відстані від осі до внутрішньої стінки трубопроводу – 1мм, крок вимірювання по окружності (відстань від осі до внутрішньої поверхні стінки) – 30мм, похибка вимірювання по кутовому положенню – 12 градусів. Крім того, інтелектуальні поршні дозволяють визначати вм'ятини на поверхні трубопроводу з параметрами: довжина $\pm$ 7,6 мм, ширина $\pm$ 25,4 мм, глибина $\pm$ 0,8 мм, кутове положення – 12 градусів.

Вводячи пов'язану з досліджуваним тілом систему координат (s, φ, r), де s – координати вздовж осі труби, φ – полярний кут, r – радіальна координата, та використовуючи для описання деформації труби функції: $\rho(s,\varphi,r)$, $\omega(s,\varphi,r)$, $\psi(s,\varphi,r)$, можна записати радіус-вектор точки труби у наступному вигляді [2] :

$$\begin{aligned}\vec{r}(s,\varphi,r) &= \vec{r}_e(s,\varphi,r,t) + \\ &+ \left[\vec{n}_e(s,\varphi,r,t)\sin\omega(s,\varphi,r,t) + \right. \\ &+ \left. \vec{b}_e(s,\varphi,r)\cos\omega(s,\varphi,r,t)\right]\rho(s,\varphi,r,t) + \\ &+ \vec{\tau}_e(s,\varphi,r,t)\psi(s,\varphi,r,t)\ ,\end{aligned} \tag{1}$$

де: $\vec{r}_e$ – радіус-вектор осі трубопроводу;

$\vec{n}_e, \vec{b}_e, \vec{\tau}_e$ – нормаль, бінормаль та дотична до осі труби.

Подання (1) дозволяє вивчати деформовані перерізи [3]. Вважаючи, що кривина та кручення осі труби змінюються мало, розглядається процес деформування, який характеризується наступними функціями деформації:

$$\rho = \rho(s,\varphi) + r,\ \ \omega = \varphi,\ \ \psi = 0\ . \tag{2}$$

При такому поданні вектора переміщень компоненти тензора деформації записуються у вигляді (з урахуванням (1) та (2)):

$$\begin{aligned}&\varepsilon_{ss} = 0.5((\frac{\partial\rho}{\partial s})^2 - 1)\\ &\varepsilon_{\varphi\varphi} = 0.5((\frac{\partial\rho}{\partial\varphi})^2 + (\rho(s,\varphi)+r)^2 - r^2)\\ &\varepsilon_{rr} = 0\\ &\varepsilon_{s\varphi} = 0.5\frac{\partial\rho}{\partial s}\frac{\partial\rho}{\partial\varphi}\\ &\varepsilon_{sr} = 0.5\frac{\partial\rho}{\partial s}\\ &\varepsilon_{\varphi r} = 0.5\frac{\partial\rho}{\partial\varphi}\,.\end{aligned} \tag{3}$$

З урахуванням допущення про пружний характер деформацій та ізотропний характер матеріалу для обчислення компонент тензора напружень використовується закон Гука. Аналітична структура функції ρ(φ,s) визначається за дискретним набором її значень, одержаних при проведенні досліджень за допомогою апаратури внутрішньотрубної діагностики. При цьому використовується апарат інтерполяції згладжуючими кубічними сплайнами за координатами φ – в кожному перерізі та s – по довжині труби.

При аналізі вм'ятин на поверхні трубопроводу розгля

дається випадок, коли об'єкт навантажено внутрішнім тиском $P_2$ та зовнішнім $P_1$. Для опису процесу деформування на сегментах $\left[x_h^j, y_h^j\right]$, $j = 1,2$ вводиться регулярна розрахункова сітка по довжині дуги. Для цього обчислюються довжини відповідних сегментів:

$$l^j = \int_{x_1^j}^{x_2^j} \sqrt{1 + \left[H'_j(x)\right]^2}\,dx, \tag{4}$$

після чого координатами вузлів розбиття регулярної сітки знаходяться із залежності:

$$\int_{x_1^j}^{x_i^j} \sqrt{1 + \left[H'_j(x)\right]^2}\,dx = \frac{l_j \cdot i}{N}, \tag{5}$$

де: $i$ – номер точки розбиття по сегменту; $N$ – кількість відрізків розбиття сегменту.

В рівнянні (4) невідомою величиною є $x_i^j$, вона знаходиться шляхом реалізації чисельного методу знаходження кореня рівняння [4-5], в якому невідомою величиною є верхня межа інтегрування.

Для опису процесу деформування кругової частини перерізу використовується розв'язок задачі Ламе [6] для труби, навантаженої внутрішнім $P_2$ та зовнішнім $P_1$ тисками, згідно з яким радіальні переміщення точок трубопроводу знаходяться за формою:

$$u = Ar + \frac{B}{r}, \tag{6}$$

де

$$A = \frac{R_2^2 P_2 - R_1^2 P_1}{2(\lambda + \mu)\left(R_1^2 - R_2^2\right)}; \quad B = \frac{(P_2 - P_1) R_2^2 R_1^2}{2\mu\left(R_1^2 - R_2^2\right)}, \quad (7)$$

$\lambda, \mu$ – параметри Ламе матеріалу, з якого виготовлено об'єкт, зв'язані з модулем Юнга $E$ та коефіцієнтом Пуассона $\sigma$ співвідношеннями:

$$\lambda = \frac{\sigma E}{(1 - 2\sigma)(1 + \sigma)}; \quad \mu = \frac{E}{2(1 + \sigma)}. \qquad (8)$$

Необхідно побудувати початкове наближення для функцій після деформації об'єкта. З цією метою визначається координати вузлів інтерполяції в контрольний момент часу. Координати $\left(x_h^{jk}, y_h^{jk}\right)$ після деформації обчислюються за формулами:

$$x_1^{jk} = x_1^j + \Delta r_j \cos\varphi_1$$
$$x_2^{jk} = x_2^j + \Delta r_j \cos\varphi_2, \qquad (9)$$

де $\varphi_1$ та $\varphi_2$ визначаються за формулами:

$$tg\varphi_1 = \frac{y_1^1}{x_1^1}; tg\varphi_2 = \frac{y_2^1}{x_2^1}. \qquad (10)$$

Величини $\Delta r_j$ обчислюються за формулами (6) при $r = R_j$, $j = 1,2.$ Прирости координат $x_h^j, h = 1,\ldots,N$ визначаються наступним чином: в кожній точці $x_h^j$ обчислюються координатами одиничних векторів нормалі до ліній $H_j(x), x \in \left[x_1^j, x_2^j\right]$ за формулами:

$$\vec{n}^j = \left\{ -\frac{H_j'(x)}{\sqrt{1 + \left[H_j'(x)\right]^2}}; \frac{1}{\sqrt{1 + \left[H_j'(x)\right]^2}} \right\}, \quad (11)$$

а з урахуванням (9) відповідні прирости координат $x_h^j$ та значень $H_j(x_h)$ обчислюються за формулами

$$x_h^{jk} = x_h^j - \Delta r_j \frac{H_j'\left(x_s^j\right)}{\sqrt{1 + \left[H_j'\left(x_s^j\right)\right]^2}},$$
$$j = 1,2; \quad h = 1,\ldots,N-1; \qquad (12)$$
$$H_j^k\left(x_h^j\right) = H_j\left(x_h^j\right) + \Delta r_j \frac{1}{\sqrt{1 + \left[H_j'\left(x_h^j\right)\right]^2}}.$$

За одержаними координатами вузлових точок $\left(x_h^{jk}, H_j^k\left(x_h^j\right)\right)$ будується інтерполяційний многочлен Ерміта для кожної з досліджуваних поверхонь. Таким чином, в початковий та контрольний момент часу відновлюються лінії деформованого перерізу на зовнішній та внутрішній поверхнях:

$$y_j = H_j(x), \quad x \in \left[x_1^j, x_2^j\right]$$
$$y_j^k = H_j^k(x), \quad x \in \left[x_1^{jk}, x_2^{jk}\right], \quad j = 1,2 \qquad (13)$$

Це дає змогу побудувати вектор переміщень для точок розрахункової сітки на ділянці деформованого перерізу, причому по товщині стінки допускається збільшення кількості розрахункових точок – для цього в формулі (9) проводяться розрахунки не тільки для граничних значень, але і для проміжних значень радіусів. Довільна контрольна точка має переміщення по осі $Ox$, так і по осі $Oy$, тому для вектора переміщень справедливим є подання

$$\vec{u} = \left(u_x, u_y, 0\right), \qquad (14)$$

$$u_x = -\Delta r_j \cdot \frac{H_j'(x)}{\sqrt{1 + \left[H_j'(x)\right]^2}},$$
$$u_y = \Delta r_j \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left[H_j'(x)\right]^2}}. \qquad (15)$$

Між координатами вектора переміщень в декартовій прямокутній та циліндричній системах координат існує взаємозв'язок за формулами:

$$u_r = u_y \cos\varphi - u_x \sin\varphi,$$
$$u_\varphi = \frac{u_y \sin\varphi + u_x \cos\varphi}{r}. \qquad (16)$$

Використовуючи (16), можна провести розрахунок напружено-деформованого стану об'єкта під дією внутрішнього та зовнішнього тиску використовуючи виключно дані про переміщення певної множини точок перерізу: вводячи позначення $x_1 = r; x_2 = \varphi; x_3 = z$, одержуємо [15]:

$$\varepsilon_{ii} = \nabla_i u_i; \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\nabla_i u_j + \nabla_j u_i\right),$$
$$\nabla_j u_i = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - u_k \Gamma_{ij}^k, \qquad (17)$$

де $\nabla_j u_i$ – коваріантна похідна вектора переміщень в циліндричні й системі координат. Для обчислення компонент тензора напружень використовується закон Гука для ізотропного тіла:

$$\sigma^{ij} = \lambda I(\varepsilon) g^{ij} + 2\mu\varepsilon^{ij}, \qquad (18)$$

де: $\sigma^{ij}$ – контраваріантні компоненти тензора напружень; $g^{ij}$ – контраваріантні компоненти матричного тензора; $\varepsilon^{ij}$ – контраваріантні компоненти тензора деформації. Для оцінки напружено-деформованого стану (НДС) об'єкта з дефектами поверхні можна запропонувати наступну схему наближеної оцінки НДС: в основу схеми закладаються відомі результати задачі Ламе для фізичних компонент тензора напружень:

$$\sigma_{rr} = \frac{\widetilde{R}_2^2 P_2}{\widetilde{R}_1^2 - \widetilde{R}_2^2}\left(1 - \frac{\widetilde{R}_1^2}{r^2}\right) - \frac{\widetilde{R}_1^2 P_1}{\widetilde{R}_1^2 - \widetilde{R}_2^2}\left(1 - \frac{\widetilde{R}_2^2}{r^2}\right),$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\widetilde{R}_2^2 P_2}{\widetilde{R}_1^2 - \widetilde{R}_2^2}\left(1 + \frac{\widetilde{R}_1^2}{r^2}\right) - \frac{\widetilde{R}_1^2 P_1}{\widetilde{R}_1^2 - \widetilde{R}_2^2}\left(1 + \frac{\widetilde{R}_2^2}{r^2}\right), \quad (19)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}\frac{\widetilde{R}_2^2 P_2 - \widetilde{R}_1^2 P}{\widetilde{R}_1^2 - \widetilde{R}_2^2},$$

проте замість значень $R_1$ та $R_2$ відповідно зовнішнього та внутрішнього радіусів об'єкта використовується відповідні радіуси кривини поверхні, які розраховуються за формулами:

$$\widetilde{R}_j = \frac{1}{K_j(x)} = \frac{\left(1 + \left[H_j{}'(x)\right]^2\right)^{3/2}}{\left|H_j{}''(x)\right|}, \qquad (20)$$

причому в формулах (19) значення внутрішнього та зовнішнього тисків обираються в залежності від знаку $H_j{}''(x)$ в кожній точці розрахункової сітки: якщо в точці $x_s^j H_j{}''\left(x_s^j\right) > 0,$ то в такому разі: внутрішнім буде тиск $P_1$, а зовнішній – $P_2$, тоді як при виконанні умови $H_j{}''\left(x_h^j\right) < 0$ в якості внутрішнього тиску в (19) вибирається $P_2$, а зовнішній – $P_1$. Справедливість запропонованої методики розрахунку НДС обґрунтовується та доводиться тим практичним фактом, що досліджувані конструкції мають малі по відношенню до характерних розмірів величини дефектів поверхні. Очевидно, що при відсутності дефектів поверхні формули (19) співпадають з відомими формулами Ламе, оскільки величини $\widetilde{R}_1$ та $\widetilde{R}_2$ співпадають з $R_1$ та $R_2$ відповідно. Наведений метод оцінки напружень дозволяє оцінювати вплив дефекту поверхні на НДС конструкції – при цьому у випадку малих розмірів дефектів можна з достатньою точністю використовувати формули (19). Реалізуючи вказаний підхід для різних перерізів об'єктів, можна вивчати особливості тривимірної інтерполяції, інформація про вплив на НДС діючих типів дозволяє виявляти ділянки, на яких, крім вказаних, діють інші типи навантажень – при цьому використовується метод суперпозиції розв'язків задачі теорії пружності.

На основі одержаних даних та розробленої моделі процесу деформування складено програму розрахунку НДС діючого трубопроводу з використанням даних внутрішньотрубної інспекції, яка відлагоджена за допомогою розв'язку модельних задач та розрахунку НДС реальних трубопроводів. В ході реалізації даної моделі розв'язана також задача оцінки необхідного рівня точності вимірювання переміщень точок труби, що дозволяє оптимізувати вибір давачів переміщень для діагностичної апаратури. Зокрема, для магістральних трубопроводів, що характеризуються діаметрами порядку 1 метра, встановлено, що вказані давачі повинні мати можливість оцінювати переміщення точок труби з точністю до 1 мм, оскільки уточнення даних проводиться з використанням апарату згладжування. Можна зробити висновок про те, що технічні характеристики інтелектуальних поршнів дозволяють ефективно використовувати розроблені моделі. Наведені технічні характеристики дозволяють визначати механічні напруження в матеріалі трубопроводу з абсолютною похибкою до 5 МПа, та відносною – 3-4%.

Розроблена методика дозволяє вдосконалити системи внутрішньотрубної діагностики, збільшити їх можливості в плані одержання кількісної інформації про напруження, що виникають в матеріалі трубопроводу.

### *Література*


1 Болгаченко Т.О. Проблеми і методи обробки та аналізу отриманих даних в задачах контролю технічного стану трубопроводів з використанням внутрішньотрубних дефектоскопів. / Т.О.Болгаченко // Наукові вісті ІМЕ "Галицька академія". –2007. – №1(11). – С. 144–147.

2 Чекурін В.Ф. Некоректна задача відновлення напружено-деформованого стану криволінійних циліндричних тіл за відомими переміщеннями певної множини точок поверхні / Чекурін В.Ф., Олійник А.П. // Крайові задачі термомеханіки: Зб. наук. пр. – К. Інститут математики НАН Праїни, 1996. – Ч. ІІ. – С. 160-165.

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

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

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

6 Седов Л.И. Механика сплошных сред / Седов Л.И. – М.: Наука, 1984. – Т. 2. – 560 с.


*Стаття поступила в редакційну колегію 21.01.09*

*Рекомендована до друку професором* ***Л. М. Заміховським***