Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології. – 2001, №433. – С. 187-190. 7. Бучма І., Михайлович Л. Методи зменшення впливу флікер-шуму в засобах вимірювання з періодичним порівнянням //Комп'ютерні технології друкарства. – 2004, №11. – С. 160-167. 8. Жукинский И.Н. Методы повышения разрешающей способности дифференциально-нулевых индикаторов периодического сравнения // Проблемы технической электродинамики. – 1973, вып. 40. – С. 52-58. 9. Бучма І. Похибки виділення обвідної методом запам'ятовування амплітудних значень у схемах періодичного порівняння // Вимірювальна техніка та метрологія. – 1999, №55. – С. 25-31. 10. Мизюк Л.Я., Проць Р.В. Широкодиапазонный дифференциальный фазонечувствительный коммутационный указатель //Отбор и передача информации. – 1980, вып. 60. – С. 84-89. 11. Бучма І.М., Михайлович Л.Ф. Варіанти побудови каналу обвідної в засобах вимірювання з періодичним порівнянням низькочастотних сигналів // Методи та прилади контролю якості. – 2003, №11. – С. 5-8. 12. Бучма І.М., Ферчук К.В. Моделювання джерела флікер-шуму в системах комп'ютерної математики //Автоматика, вимірювання та керування. – 2005, №530. – С. 79-83.

УДК 622.692.4

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КВАЗІЦИЛІНДРИЧНИХ ТІЛ З ДЕФЕКТАМИ ПОВЕРХНІ ПІД ДІЄЮ ВНУТРІШНЬОГО ТИСКУ

© Олійник А.П., Івасів О.Я., 2006
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Розглянуто математичні моделі процесу деформування та напруженого стану квазіциліндричних тіл з дефектами поверхні під дією внутрішнього тиску. Вихідними даними для моделювання є координати точок перерізів, в яких є дефекти. Обґрунтовано вибір методу інтерполяції, запропоновано методику визначення компонент вектора переміщень. У випадку, коли перерізи мають дефекти з малими відносними розмірами, запропоновано методику, що базується на використанні розв'язку задачі Ламе з урахуванням змінних радіусів кривини ліній поверхні об'єктів. Проведено тестові розрахунки, визначено межі застосування методики та напрямки її можливого узагальнення на випадок тривимірної конфігурації досліджуваного тіла

В процесі експлуатації об'єктів, що знаходяться під дією високого тиску (трубопроводи, технологічні ємності та резервуари тощо) виникає проблема оцінки їх напружено-деформованого стану за умовами наявності дефектів поверхні (вм'ятини, випуклості). Такого роду дефекти можуть виникати внаслідок недотримання технологічних норм при спорудженні, дії силових факторів різної природи. Вказані об'єкти продовжують експлуатуватись, тому виникає та вирішується проблема оцінки діючих напружень, характеру їх розподілу. Існуючі розрахункові співвідношення базуються на спрощених моделях процесу деформування об'єктів [1], крім того, відомі результати стосуються оцінки напружено-деформованого стану об'єктів заданої форми [2, 3] без урахування визначеної шляхом експериментальних вимірювань конфігурації поверхні об'єктів.

З метою оцінки напружено-деформованого стану квазіциліндричних тіл з дефектами поверхні розглядається переріз об'єкта, який в недеформованому стані має форму кола, а для зовнішнього R_1 та внутрішнього R_2 радіусів виконується умова:

$$y_j = \pm\sqrt{R_j^{\,2} - x^2},\ j = 1{,}2, \qquad (1)$$

де x, y_j –горизонтальна та вертикальна координати точки на зовнішній та внутрішній границях перерізу; $x \in [-R_j, R_j]$; знаку "+" відповідає частина перерізу над горизонтальною віссю, що проходить через його центр, а знаку "–" – частина поверхні під цією віссю.

Нехай на деякій частині перерізу знаходиться дефект, який з математичної точки зору характеризується функцією $f_j(x)$, яка мало відрізняється від функції (1). Індекс “j”, як і в формулі (1), означає, що дефект знаходиться як на зовнішній (j=1), так і на внутрішній (j=2) поверхнях. Для подання функції $f_j(x)$ за відомими координатами точок перерізу на зовнішній та внутрішній поверхнях будується інтерполяційний кубічний згладжуючий сплайн з параметрами згладжування, які визначаються точністю ε вимірювання координат точок перерізу [4]. Для сплайну обираються граничні умови у вигляді значень похідних в граничних точках зони дефекту на зовнішній та внутрішній поверхнях:

$$S_1'(x_1)=y_1'(x_1),\quad S_2'(x_1)=y_2'(x_1),\qquad S_1'(x_2)=y_1'(x_2),\quad S_2'(x_2)=y_2'(x_2),\tag{2}$$

де x_1 та x_2 – координати границь зони дефекту. Таким чином, за значеннями координат $N-2$ внутрішніх вузлів інтерполяції (x_k^j, y_k^j), $k=2,\ldots,N-1$; та значеннями координат граничних точок зони дефекту в початковий момент часу дефект задається функціями:

$$f_1(x)=S_1(x),\quad x\in\left[x_1^1, x_2^1\right],\qquad f_2(x)=S_2(x),\quad x\in\left[x_1^2, x_2^2\right],\tag{3}$$

де $S_j(x)$ – інтерполяційний кубічний згладжуючий сплайн, побудований за вузлами (x_k^j, y_k^j) з умовами (2).

Розглядається випадок, коли об’єкт навантажено внутрішнім тиском P_2. Для опису процесу деформування на сегментах $[x_1^j,\ x_2^j]$ вводиться регулярна розрахункова сітка по довжині дуги. Для цього обчислюються довжини відповідних сегментів:

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

після чого координати вузлів розбиття регулярної сітки знаходяться із залежності:

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

де i – номер точки розбиття по сегменту, N – кількість відрізків розбиття сегменту.

В рівнянні (5) невідомою величиною є x_i^j. Вона знаходиться шляхом реалізації чисельного методу знаходження кореня рівняння, в якому невідомою величиною є верхня межа інтегрування.

Для опису процесу деформування кругової частини перерізу використовується розв’язок задачі Ламе [5] для труби, навантаженої внутрішнім P_2 та зовнішнім P_1 тисками, згідно з яким радіальні переміщення точок трубопроводу знаходяться за формулою:

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

де

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

λ, μ – параметри Ламе матеріалу, з якого виготовлено об’єкт, зв’язані з модулем Юнга E та коефіцієнтом Пуасона σ співвідношеннями:

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

Необхідно побудувати початкове наближення для функцій (3) після деформації об’єкта. З цією метою визначаються координати вузлів інтерполяції в контрольний момент часу. Координати границь сегментів $\left(x_1^{jd}, x_2^{jd}\right)$ після деформації обчислюються за формулами:

$$x_1^{jd}=x_1^j+\Delta r_j\cos\varphi_1,\qquad x_2^{jd}=x_2^j+\Delta r_j\cos\varphi_2,\tag{9}$$

де φ_1 та φ_2 визначаються за формулами:

$$tg\varphi_1=\frac{y_1^1}{x_1^1},\quad tg\varphi_2=\frac{y_2^1}{x_2^1}.\tag{10}$$

Величини Δr_j обчислюються за формулами (6) при $r=R_j$, $j=1,2$. Прирости координат x_k^j, $k=2,\ldots,N-1$ визначаються наступним чином: в кожній точці x_k^j за формулами (3) обчислюються координати одиничних векторів нормалі до ліній $S_j(x)$, $x\in\left[x_1^j, x_2^j\right]$ за формулами:

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

а з урахуванням (11) відповідні координати x_k^{jd} та значення $S_j^d(x_k^j)$ обчислюються за формулами:

$$x_k^{jd}=x_k^j-\Delta r_j\frac{S_j'(x_k^j)}{\sqrt{1+\left[S_j'(x_k^j)\right]^2}},\ j=1,2;\qquad k=2,\ldots,N-1;\qquad S_j^d(x_k^j)=S_j(x_k^j)+\Delta r_j\frac{1}{\sqrt{1+\left[S_j'(x_k^j)\right]^2}}.\tag{12}$$

За одержаними координатами вузлових точок $\left(x_k^{jd}, s_j^d(x_k^j)\right)$ будується інтерполяційний кубічний сплайн для кожної з досліджуваних поверхонь. При цьому граничні умови для сплайну задаються аналогічно (2) з урахуванням того, що в (1) радіуси визначаються за формулами:

$$R_j^d = R_j + \Delta r_j. \tag{13}$$

Таким чином, в початковий та контрольний моменти часу відновлюються лінії деформованого перерізу на зовнішній та внутрішній поверхнях:

$$y_j^d = S_j^d(x), \quad x \in \left[x_1^{jd}, x_2^{jd}\right], \quad j = 1,2. \tag{14}$$

Це дозволяє побудувати вектор переміщень для точок розрахункової сітки на ділянці деформованого перерізу, причому по товщині стінки допускається збільшення кількості розрахункових точок – для цього в формулі (12) проводяться розрахунки не тільки для граничних значень, але і для проміжних значень радіусів. Довільна контрольна точка має переміщення як по осі Ox , так і по осі Oy. Тому для вектора переміщень справедливим є подання

$$\vec{u} = (u_x, u_y, 0), \tag{15}$$

де

$$\begin{aligned} u_x &= -\Delta r_j \cdot \frac{S_j'(x)}{\sqrt{1+\left[S_j'(x)\right]^2}}, \\ u_y &= \Delta r_j \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\left[S_j'(x)\right]^2}}. \end{aligned} \tag{16}$$

Між координатами вектора переміщень в декартовій прямокутній та циліндричній системах координат існує взаємозв’язок:

$$\begin{aligned} u_r &= u_y \cos\varphi - u_x \sin\varphi, \\ u_\varphi &= \frac{u_y \sin\varphi + u_x \cos\varphi}{r}. \end{aligned} \tag{17}$$

Згідно (17) 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 [5]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ii} &= \nabla_i u_i; \ \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\nabla_i u_j + \nabla_j u_i\right), \\ \nabla_j u_i &= \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - u_k \Gamma_{ij}^k, \end{aligned} \tag{18}$$

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

$$\sigma^{ij} = \lambda I(\varepsilon) g^{ij} + 2\mu\varepsilon^{ij}, \tag{19}$$

де σ^{ij} – контраваріантні компоненти тензора напружень, g^{ij} – контраваріантні компоненти матричного тензора, ε^{ij} – контраваріантні компоненти тензора деформації. Проведені тестові розрахунки показують, що $u_r >> u_\varphi$, тому 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:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \frac{\widetilde{R}_2^2 P_2}{\widetilde{R}_1^2 - \widetilde{R}_2^2}\left(1 - \frac{\widetilde{R}_1^2}{r^2}\right) - \frac{\widetilde{R}_1^2 P_1}{\widetilde{R}_1^2 - \widetilde{R}_2^2}\left(1 - \frac{\widetilde{R}_2^2}{r^2}\right), \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{\widetilde{R}_2^2 P_2}{\widetilde{R}_1^2 - \widetilde{R}_2^2}\left(1 + \frac{\widetilde{R}_1^2}{r^2}\right) - \frac{\widetilde{R}_1^2 P_1}{\widetilde{R}_1^2 - \widetilde{R}_2^2}\left(1 + \frac{\widetilde{R}_2^2}{r^2}\right), \\ \sigma_{zz} &= \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \frac{\widetilde{R}_2^2 P_2 - \widetilde{R}_1^2 P}{\widetilde{R}_1^2 - \widetilde{R}_2^2}, \end{aligned} \tag{20}$$

проте замість значень R_1 та R_2 відповідно зовнішнього та внутрішнього радіусів об’єкта використовується відповідні радіуси кривизни ліній, які описують границі перерізу, що розраховуються за формулами (3):

$$\widetilde{R}_j = \frac{1}{K_j(x)} = \frac{\left(1 + \left[S_j'(x)\right]^2\right)^{3/2}}{\left|S_j''(x)\right|}. \tag{21}$$

Причому в формулах (20) значення внутрішнього та зовнішнього тисків обираються в залежності від знаку $S_j''(x)$ в кожній точці розрахункової сітки: якщо в точці $x_k^j S_j''(x_k^j) > 0$, то в такому разі внутрішнім буде тиск P_1, а зовнішнім – P_2. Тоді як при виконанні умови $S_j''(x_k^j) < 0$ як внутрішній тиск в (20) вибирається тиск P_2, а зовнішній тиск – 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 (20) 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 (20), а при значних величинах дефектів (більше 0,01 % характерного розміру об’єкта) доцільно використовувати модель (2)–(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.

1. БраунУ., Сроули Д. Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации. – М.: Мир, 1972. – 246 с. 2. Карзов Г.П., Леонов В.П., Тимофеев Б.Т. Сварные сосуды высокого давления. – Л.:Машиностроение, 1982. – 287с. 3. Трубопровідний транспорт газу / за ред. М.П.Ковалка. – К.: агентство з раціонального використання енергії та екології, 2003. – 600с. 4. Мартинюк Х.В., Олійник А.П. Математичне моделювання напружено-деформованого стану ділянок трубопроводу з оптимізацією процедури згладжування початкових даних // Методи та прилади контролю якості, №13, 2005. – С.21-25. 5. Седов Л.И. Механика сплошной среды. – М.:Наука, 1984, Т.2. – 560 с.

УДК 681.3.06+681.518.54.621.51

ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ НАГНІТАЧІВ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ЗА ДОПОМОГОЮ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

© Скріпка О.А., Горбійчук М.І., 2006
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

За допомогою імітаційного моделювання досліджено ефективність методу діагностування нагнітачів природного газу, яке здійснюється з використанням нейромереж. Показано, що при існуючих засобах вимірювання технологічних параметрів мережа може в 0,25 % випадках неправильно віднести діагностичну ознаку до одного із трьох класів – придатний, працездатний і непрацездатний

Сучасні газоперекачувальні агрегати – апарати довготривалої експлуатації. Тому збір експериментального матеріалу, який послужив би основою для навчання нейромереж з метою ідентифікації їх технічного стану вимагає значних затрат часу. Процес навчання моделі і перевірку запропонованого методу діагностування можна значно пришвидшити, якщо скористатись технологією імітаційного моделювання. Остання передбачає створення імітаційної моделі, яка є формальним описом логіки функціонування нагнітача природного газу, враховуючи найсуттєвіші причинно-наслідкові зв'язки, і яка забезпечує проведення статистичних експериментів. При цьому повинні бути враховані дві важливі обставини [1]:

а) взаємозв'язок між окремими елементами системи (нагнітача), а також між деякими величинами (параметрами) може бути поданий у вигляді певних аналітичних залежностей;

б) модель можна вважати ефективною, тільки в тому випадку, коли в ній відтворені лише ті властивості, які впливають на значення вибраного показника ефективності функціонування реальної системи.

Оцінка технічного стану відцентрового нагнітача (ВН) здійснюється [2] за трьома показниками:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\varepsilon - \varepsilon^*}{\varepsilon^*}, \tag{1}$$

$$\Delta T_2 = \frac{T_2 - T_2^*}{T_2^*}, \tag{2}$$

$$\Delta N = \frac{N - N^*}{N^*}, \tag{3}$$

де ε – ступінь стиску, N – внутрішня потужність ВН, T_2 – температура газу на виході ВН.

Значком „*” позначені базові значення відповідних величин, які обчислюються за формулами [3]:

$$\varepsilon^* = f_\varepsilon(x, y), \tag{4}$$

$$\frac{N^*}{\rho_в}\left(\frac{n_0}{n}\right)^3 = f_N(x), \tag{5}$$

де $\rho_в$ – густина газу, приведена до умов всмоктування; n_0, n – відповідно номінальне і поточне значення швидкості обертання ротора нагнітача.

Залежності $f_\varepsilon(x, y)$ і $f_N(x)$ – це паспортні (зведені) характеристики нагнітачів, які надаються у