

Overflow: [online resource] 2014 stack exchange inc. URL : <http://stackoverflow.com/> 6. 2014 SolidWorks API Help: [online resource] 1995-2014 DassaultSystemes. URL: <http://help.solidworks.com> 7. LukeMalpass. SolidWorks 2009 API: Advanced Product Development. AngelSix, 2009. 246 Print. 8. Freeman A. Pro ASP.NET 4.5 in C#. 5th edition. Apress, 2013. 1198 Print. 9. Proektirovanie turbogeneratorov: ucheb. posobie dlya vuzov V. I. Izvekov, N.A. Serihin, A.I. Abramov. Moscow: Izdatel'stvo MEI, 2005. 440 Print.

Поступила (received) 22.09.2014

УДК 621.643.8

Г.І. ЛЬВОВ, д-р техн. наук, професор НТУ «ХПІ», Харків
В.Г. МАРТИНЕНКО, студент НТУ «ХПІ», Харків

ЧИСЕЛЬНО-АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОРТОТРОПНОЇ В'ЯЗКОПРУЖНОСТІ СКЛОПЛАСТИКУ НА ПРИКЛАДІ РЕМОНТНОЇ НАКЛАДКИ МАГІСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДУ

Описано чисельно-аналітичні дослідження напружено-деформованого стану ділянки трубопроводу з в'язкопружною ремонтною накладкою в плоскій постановці. Розроблено математичну модель ортотропної в'язкопружності. З метою розв'язання математичної моделі запропоновано метод, заснований на використанні квадратурних формул для приблизного обчислення інтегралів та аналітичному вирішенні неоднорідних диференціальних рівнянь. Результати розрахунків представлено у вигляді графіків розподілу переміщень та напружень за радіусом та у часі. Зроблено висновок щодо доцільності врахування ортотропії в'язкопружних властивостей матеріалу при вирішенні задач в'язкопружності.

Ключові слова: ремонтний бандаж, ортотропна в'язкопружність, інтегральне рівняння, квадратурна формула

Вступ. В наш час, коли розвинута промисловість є запорукою економічного та політичного успіху країни, природний газ як джерело тепла є дуже цінною енергетичною складовою багатьох сфер індустрії. Окрім того ця корисна копалина широко використовується в опалюванні та теплопостачанні житлової інфраструктури. З метою її транспортування на великі відстані використовуються магістральні трубопроводи, основним матеріалом для виготовлення яких є сталь. В процесі їх експлуатації через корозію металу та механічні пошкодження в їхніх стінках виникають локальні порівняно з основними розмірами конструкції дефекти, які з точки зору механіки є концентраторами напружень [1]. Такі концентратори, враховуючи великий внутрішній тиск у трубопроводі, можуть викликати швидке зростання дефектів, виникнення тріщин та, як результат, руйнування усєї конструкції, що є дуже небезпечним для життя людей та економічного стану країни явищем. Для запо-

© Г.І. Львов, В.Г. Мартиненко, 2014

бігання цієї проблеми використовують різноманітні види ремонту газопроводів, серед яких одним з основних є бандажування композитними накладками (бандажами) [2-5] в місці дислокації дефекту (рис. 1). В якості композитного матеріалу частіше за все використовується склопластик, що під дією великих навантажень проявляє в'язкопружні властивості [6, 7]. При розрахунках напружено-деформованого стану бандажованої ділянки трубопроводу, які неодмінно потрібні для з'ясування геометричних та фізичних параметрів ремонту, а також його доцільності взагалі, постає питання щодо коректності обраної фізичної та математичної моделей в'язкопружності. Саме тому розробка адекватної моделі такого процесу стосовно, зокрема, склопластику є актуальною на даний момент задачею.



Рисунок 1 – Склопластиковий бандаж, нанесений на трубопровід

1 Постановка задачі. Розглянемо ділянку сталевого трубопроводу з нанесеною на нього ремонтною накладкою, достатньо протяжною для того, щоб вважати на основній частині її довжини напружено-деформований стан плоским та знехтувати крайовими ефектами (рис. 1). Такий підхід стає також можливим у разі неврахування дефектів у стінках трубопроводу. Відтак задачу будемо розглядати в плоскій постановці. При цьому плоска розрахункова модель, отримана як поперечний переріз бандажованого трубопроводу, є, в свою чергу, вісесиметричною конструкцією, що дозволяє звести задачу до одновимірної з усього однією кінематичною змінною.

На рис. 2 представлена розрахункова схема задачі, на якій сталевий трубопровід показаний позначкою (I), а склопластикова накладка – позначкою (II). Сталь вважається пружним однорідним ізотропним матеріалом, а склопластик – в'язкопружним однорідним ортотропним. На конструкцію діє внутрішній рівномірно розподілений тиск P . Як вже було сказано вище, через вісесиметричність розрахункової моделі основні функції напружено-дефор-

мованого стану будуть залежати від однієї просторової змінної – радіальної координати r , до якої із врахуванням ефектів у часі додається змінна часу t . Незалежною кінематичною змінною буде радіальне переміщення трубопроводу та бандажу u . Така постановка задачі, враховуючи описані нюанси реальної конструкції, не вносить значної похибки в оцінку її напружено-деформованого стану та при цьому дозволяє спростити пружну математичну модель для виконання основної задачі – розробки на її основі моделі ортотропної в'язкопружності та оцінки доцільності її моделювання порівняно із більш простою моделлю [8], в якій ступінь анізотропії в'язкопружних властивостей визначається ступенем анізотропії пружних властивостей.

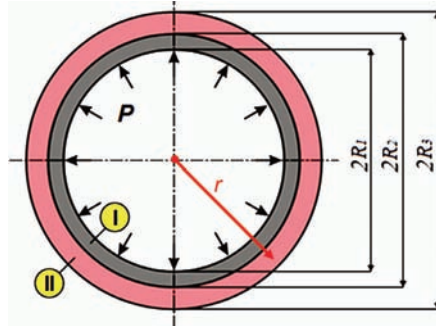


Рисунок 2 – Схема задачі в плоскій постановці

2 Теоретичні положення. Запишемо згідно з [9] систему рівнянь теорії пружності в полярній системі координат для випадку ортотропного в'язкопружного матеріалу, в якому ступінь анізотропії в'язкопружних властивостей не залежить від ступеню анізотропії пружності, в плоскій вісесиметричній постановці:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\sigma_r^{(II)}(r,t)}{dr} + \frac{\sigma_r^{(II)}(r,t) - \sigma_\theta^{(II)}(r,t)}{r} = 0; \\ \varepsilon_r^{(II)}(r,t) = \frac{du^{(II)}(r,t)}{dr}; \\ \varepsilon_\theta^{(II)}(r,t) = \frac{u^{(II)}(r,t)}{r}; \\ \sigma_r^{(II)}(r,t) = C_{11} \left[\varepsilon_r^{(II)}(r,t) - \int_0^t K_{11}(t-s) \varepsilon_r^{(II)}(r,s) ds \right] + \\ + C_{12} \left[\varepsilon_\theta^{(II)}(r,t) - \int_0^t K_{12}(t-s) \varepsilon_\theta^{(II)}(r,s) ds \right]; \\ \sigma_\theta^{(II)}(r,t) = C_{21} \left[\varepsilon_r^{(II)}(r,t) - \int_0^t K_{21}(t-s) \varepsilon_r^{(II)}(r,s) ds \right] + \\ + C_{22} \left[\varepsilon_\theta^{(II)}(r,t) - \int_0^t K_{22}(t-s) \varepsilon_\theta^{(II)}(r,s) ds \right], \end{array} \right. \quad (1)$$

де r – радіальна координата; t – координата часу; s – час, що сплинув; u – радіальне переміщення; $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$ – радіальні та окружні деформації відповідно; σ_r, σ_θ – радіальні та окружні напруження відповідно; $C_{11}, C_{22}, C_{12} = C_{21}$ – коефіцієнти матриці жорсткості ортотропного матеріалу, що можуть бути виражені через модулі пружності та коефіцієнти Пуассона; (I), (II) – позначки для матеріалу трубопроводу та матеріалу бандажу відповідно; $K_{11}(t-s), K_{22}(t-s), K_{12}(t-s) = K_{21}(t-s)$ – ядра релаксації для ортотропної в’язкопружності, які в загальному випадку представлені рядами Проні:

$$K_{ij}(t-s) = \sum_{k=1}^{n_{ij}} a_{ij}^{(k)} \exp(-b_{ij}^{(k)}(t-s)), \quad \{i, j = 1, 2\}, \quad (2)$$

де $a_{ij}(k), b_{ij}(k)$ – відповідно коефіцієнти та показники рядів Проні, n_{ij} – кількість членів рядів Проні.

Якщо прийняти $n_{ij} = 1$ у формулі (2), то вона запишеться у вигляді:

$$K_{ij}(t-s) = a_{ij} \exp(-b_{ij}(t-s)), \quad \{i, j = 1, 2\}. \quad (3)$$

Тоді, спираючись на рівність (3), рівняння закону Гуку з системи (1) можуть бути переписані в наступному вигляді:

$$\begin{cases} \sigma_r^{(II)}(r, t) = C_{11} \left[\varepsilon_r^{(II)}(r, t) - a_{11} \int_0^t e^{-b_{11}(t-s)} \varepsilon_r^{(II)}(r, s) ds \right] + \\ + C_{12} \left[\varepsilon_\theta^{(II)}(r, t) - a_{12} \int_0^t e^{-b_{12}(t-s)} \varepsilon_\theta^{(II)}(r, s) ds \right]; \\ \sigma_\theta^{(II)}(r, t) = C_{21} \left[\varepsilon_r^{(II)}(r, t) - a_{21} \int_0^t e^{-b_{21}(t-s)} \varepsilon_r^{(II)}(r, s) ds \right] + \\ + C_{22} \left[\varepsilon_\theta^{(II)}(r, t) - a_{22} \int_0^t e^{-b_{22}(t-s)} \varepsilon_\theta^{(II)}(r, s) ds \right]. \end{cases} \quad (4)$$

Рівняння, що відповідає системі (1) з врахуванням (4), матиме наступний інтегро-диференціальний вигляд:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{d^2 u^{(II)}(r, t)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du^{(II)}(r, t)}{dr} - \gamma^2 \frac{u^{(II)}(r, t)}{r^2} \right] - \\ & - a_{11} \int_0^t \left[\frac{d^2 u^{(II)}(r, s)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du^{(II)}(r, s)}{dr} - \gamma^2 \mu^2 \omega^2(t-s) \frac{u^{(II)}(r, s)}{r^2} \right] \times \\ & \times \exp(-b_{11}(t-s)) ds = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

де $\gamma^2 = C_{22}/C_{11}, \mu^2 = a_{22}/a_{11}, \omega^2(t-s) = \exp(-b_{22}(t-s))/\exp(-b_{11}(t-s))$.

Варто відмітити, що для випадку пружного ізотропного матеріалу рівняння (5) перетвориться в лінійне однорідне диференціальне рівняння другого порядку, що було показано в роботі [8]. Його розв’язок запишеться наступним чином:

$$u^{(I)}(r, t) = A_1(t)r + A_2(t)/r, \quad (6)$$

де $A_1(t), A_2(t)$ – в загальному випадку залежні від часу та незалежні від радіусу константи інтегрування диференціального рівняння.

Отримане інтегро-диференційне рівняння (5) потребує розв'язання. Згідно з [10] в загальному вигляді квадратурну формулу для приблизного підрахунку визначеного інтегралу можна записати як кінцеву суму:

$$\int_0^t f(s) ds \approx \sum_{m=0}^n D_m f(s_m), \quad (7)$$

де $f(s)$ – функція, що інтегрується, D_m – квадратурні множники, s_m – точки сітки.

Тоді рівняння (5) із врахуванням квадратурної формули (7) перепишеться:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{d^2 u^{(II)}(r, t_n)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du^{(II)}(r, t_n)}{dr} - \gamma^2 \frac{u^{(II)}(r, t_n)}{r^2} \right] - \\ & - a_{11} \sum_{m=0}^n D_m \left[\frac{d^2 u^{(II)}(r, t_m)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du^{(II)}(r, t_m)}{dr} - \gamma^2 \mu^2 \omega^2 (t_n - t_m) \frac{u^{(II)}(r, t_m)}{r^2} \right] \times \\ & \times \exp(-b_{11}(t_n - t_m)) = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Далі буде використовуватись позначення: $u^{(II)}(r, t_m) = u_m^{(II)}(r) = u_m$.

Після ряду алгебраїчних перетворень рівняння (8) набуде вигляду:

$$\begin{aligned} & \left[(1 - a_{11} D_n) \frac{d^2 u_n}{dr^2} + (1 - a_{11} D_n) \frac{1}{r} \frac{du_n}{dr} - (1 - a_{11} D_n \mu^2) \gamma^2 \frac{u_n}{r^2} \right] = \\ & = a_{11} \sum_{m=0}^{n-1} D_m \left[\frac{d^2 u_m}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_m}{dr} - \gamma^2 \mu^2 \omega^2 (t_n - t_m) \frac{u_m}{r^2} \right] \exp(-b_{11}(t_n - t_m)). \end{aligned} \quad (9)$$

Для початкової функції u_0 , тобто для $n = 0$, вираз (9) спроститься:

$$\frac{d^2 u_0}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_0}{dr} - \gamma^2 \frac{u_0}{r^2} = 0. \quad (10)$$

Рівняння (9) являє собою лінійне неоднорідне диференційне рівняння другого порядку відносно функції радіальної координати u_n , в правій частині якого міститься сума диференційних операторів над відомими функціями u_m , що знаходяться з аналогічних виразу (9) рівнянь, записаних та розв'язаних при попередніх моментах часу. Тобто якщо додати до диференційного рівняння (9) вираз (10) та варіювання $\{n = 1 \dots p\}$ (де p – це число часових відрізків, на які побитий проміжок $[0 \dots t]$), то воно вже представлятиме ітеративний процес, на кожній ітерації якого буде знаходитись розв'язок (9) у загальному вигляді:

$$\begin{cases} u_0 = A_{30} r^\gamma + A_{40} r^{-\gamma}; \\ u_n = A_{3n} r^\gamma \left(\gamma \sqrt{\frac{(1 - a_{11} D_n \mu^2)}{(1 - a_{11} D_n)}} \right) + A_{4n} r^{-\gamma} \left(-\gamma \sqrt{\frac{(1 - a_{11} D_n \mu^2)}{(1 - a_{11} D_n)}} \right) + \varphi_n, \end{cases} \quad (11)$$

де $\varphi_n = \varphi_n(r)$ – частинний розв'язок (9), $n = 1 \dots p$.

Якщо на кожній ітерації додати до (11) рішення (6) у формі:

$$u^{(I)}(r, t_n) = A_{1n}r + A_{2n}/r, \quad (12)$$

то отримаємо систему двох розв'язків, які на кожному шагу будуть містити у собі чотири константи інтегрування $A_{1n}, A_{2n}, A_{3n}, A_{4n}$. Ці константи мають бути знайдені з описаних у [8] граничних умов та умов спряженості, які також повинні бути записані для конкретної ітерації:

$$\begin{cases} \sigma_r^{(I)}(R_1, t_n) = -P; \\ u_r^{(I)}(R_2, t_n) = u_r^{(II)}(R_2, t_n); \\ \sigma_r^{(I)}(R_2, t_n) = \sigma_r^{(II)}(R_2, t_n); \\ \sigma_r^{(II)}(R_3, t_n) = 0. \end{cases} \quad (13)$$

Після переписування усіх умов в системі (13) через радіальні переміщення з подальшим вираженням інтегралів, що з'явилися в результаті цього, за допомогою квадратурної формули (7), вона буде являти собою систему чотирьох лінійних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих констант $A_{1n}, A_{2n}, A_{3n}, A_{4n}$. Після її розв'язання отримаємо рішення для функцій $u^{(I)}(r, t_n)$ та $u^{(II)}(r, t_n)$, тобто рішення на певній ітерації. Пробігаючи таким чином усі n аж до p можна знайти приблизний розподіл радіальних переміщень у часі до кінцевого моменту. А з використанням переписаних за допомогою квадратурної формули (7) геометричних та фізичних співвідношень з (1), можливо знайти також основні компоненти напружено-деформованого стану конструкції. Таким чином в наявності будуть їхні чисельні (табличні) залежності від координати часу t , але в той же час аналітичні від радіальної координати r , в чому й полягає чисельно-аналітичний метод для вирішення неоднорідної системи інтегро-диференційних рівнянь.

3 Результати та обговорення. Для реалізації описаного в п. 2 ітеративного процесу була обрана конкретна квадратурна формула – права формула прямокутників, яка при рівномірній сітці має вигляд:

$$\int_0^t f(s)ds \approx \sum_{m=1}^n (s_m - s_{m-1})f(s_m) = \sum_{m=1}^n hf(s_m), \quad (14)$$

де h – шаг рівномірної сітки, $s_m = m \cdot h$, а коефіцієнти з формули (7):

$$D_m = \begin{cases} 0, & m = 0; \\ h, & m = [1, n]. \end{cases} \quad (15)$$

Слід зазначити, що хоча й ця формула не володіє дуже великою точністю порівняно з більш складними квадратурними формулами, але в даному випадку вона дозволяє з низькою похибкою знаходити результати.

В ході розрахунків напружено-деформованого стану конструкції були використані геометричні та фізичні параметри, аналогічні тим, що застосовувались до аналітичної моделі в роботі [8]:

$$\begin{aligned} R_1 &= 0,510 \text{ [м]}; & R_2 &= 0,522 \text{ [м]}; & R_3 &= 0,572 \text{ [м]}; \\ B_{11} &= B_{22} = 23,08 \cdot 10^{10} \text{ [Па]}; & B_{12} &= B_{21} = 6,92 \cdot 10^{10} \text{ [Па]}; \\ C_{11} &= 87,57 \cdot 10^8 \text{ [Па]}; & C_{22} &= 131,35 \cdot 10^8 \text{ [Па]}; & C_{12} &= C_{21} = 31,52 \cdot 10^8 \text{ [Па]}; \end{aligned}$$

$$P = 5 \cdot 10^6 \text{ [Па]} .$$

Це дозволяє окрім чисельної похибки зробити підрахунок розходження результатів між аналітичною моделлю квазіізотропної в'язкопружності, що має місце у [8], та чисельно-аналітичною моделлю ортотропної в'язкопружності, що описана в даній роботі, якщо в формулі (4) та подальших міркуваннях прийняти:

$$\begin{cases} a_{11} = a_{22} = a_{12} = a_{21} = a; \\ b_{11} = b_{22} = b_{21} = b_{12} = b. \end{cases} \quad (16)$$

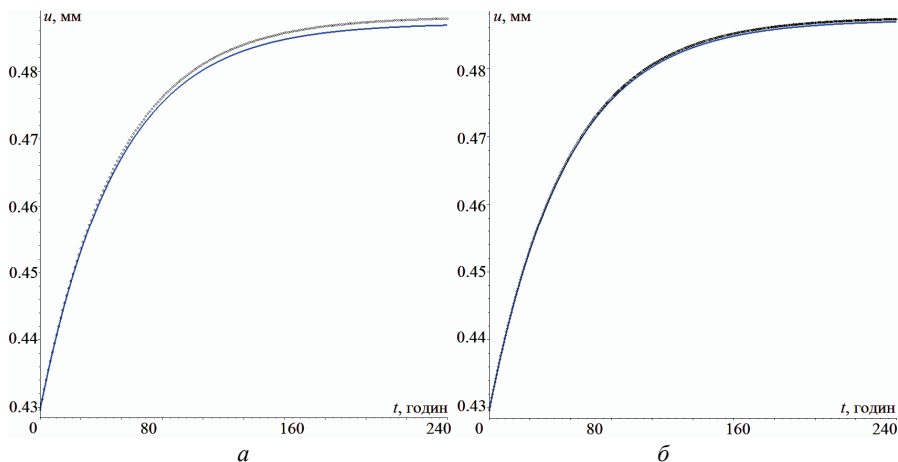


Рисунок 3 – Порівняння графіків радіальних переміщень у часі при $r = R_2$ для аналітичної та чисельно-аналітичної моделей при різній кількості точок чисельного інтегрування: a – невелика кількість точок; b – оптимальна кількість точок

На рис. 3 показано порівняння графіків зміни у часі радіальних переміщень та радіальних напружень в конструкції, побудованих на основі аналітичної та чисельно-аналітичної моделей для $a = 0,002$ [-]; $b = 0,003$ [-] та $r = R_2$.

Як можна побачити з графіків, вже для числа відрізків, на який ділиться проміжок часу $[0, 200]$ годин, рівного 200, графіки переміщень за двома моделями майже співпадають (рис. 3, а). Для числа ж відрізків, рівного 500, їх вже неможливо візуально відрізнити один від одного (рис. 3, б), а відносне розходження результатів складає менше 0,1 %. Якісно аналогічна картина спостерігається для радіальних переміщень, підрахованих при інших значеннях радіальної координати, і для основних компонент напружено-деформованого стану. Тому для подальшого аналізу ортотропної в'язкопружності береться саме таке значення числа ітеративних точок (не враховуючи нульову ітерацію): $p = 500$.

При моделюванні ортотропної в'язкопружності використовувались наступні значення її параметрів:

$$a_{11} = 0,002 [-]; \quad a_{22} = 0,002 [-]; \quad a_{12} = a_{21} = 0,001 [-];$$

$$b_{11} = 0,002 [-]; \quad b_{22} = 0,002 [-]; \quad b_{12} = b_{21} = 0,004 [-].$$

Такий набір параметрів припускає, що в'язкопружні властивості в зсувному напрямку між окружною та радіальною координатами мають більш швидку релаксацію та менше впливають на зміни картини напружено-деформованого стану конструкції, ніж властивості в радіальному та окружному напрямках.

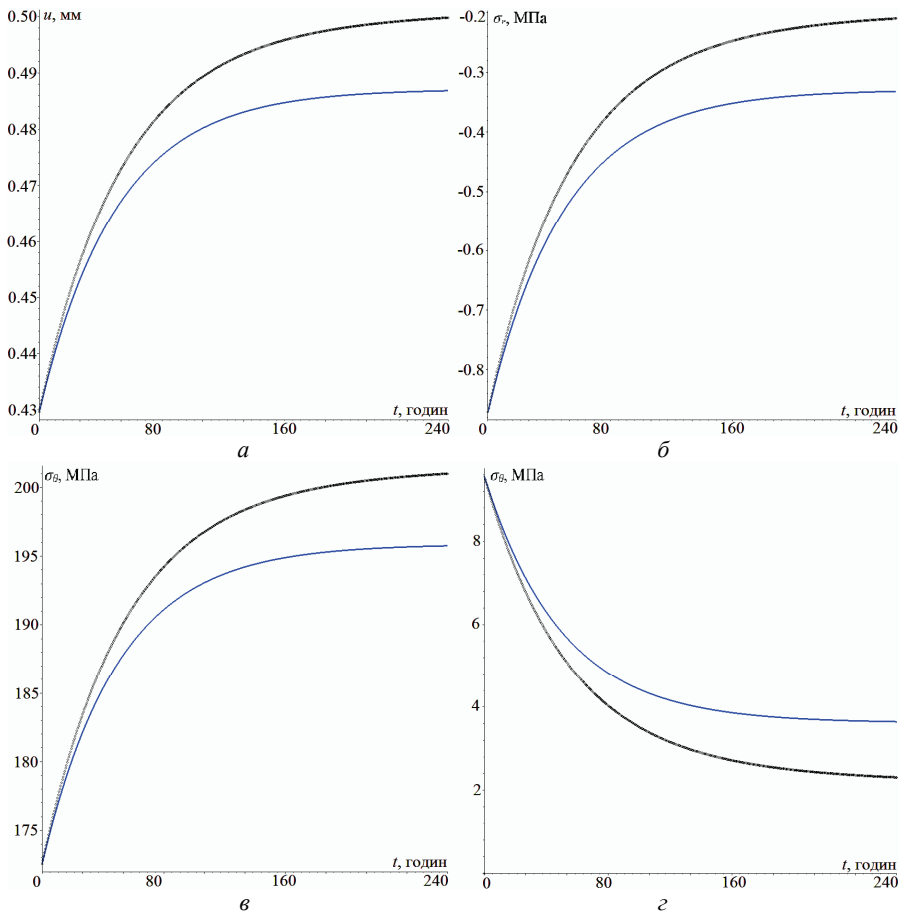


Рисунок 4 – Основні компоненти напружено-деформованого стану конструкції у часі при $r = R_2$ для різних видів в'язкопружності: a – радіальне переміщення; b – радіальні напруження; v – окружні напруження в трубопроводі; z – окружні напруження в бандажі

На рис. 4 показані залежності основних компонент напружено-деформо-

ваного стану конструкції від часу для квазіізотропної в'язкопружності, підрахованої за аналітичною моделлю із незмінними порівняно із рис. 3 її параметрами, та для ортотропної в'язкопружності, підрахованої за чисельно-аналітичною із новими параметрами, в місці контакту бандажа та трубопроводу.

На рис. 4, *a*, 4, *б* та 4, *в* крива, що відповідає рішенням для ортотропної в'язкопружності, лежить зверху від кривої квазіізотропної в'язкопружності, а на рис. 4, *г* – знизу. Як видно з рисунків, незначна на перший погляд зміна в чисельних параметрах математичної моделі викликає зростання радіальних переміщень, пов'язаних із в'язкопружністю, приблизно на 20 %. Це спричиняє більше порівняно з попереднім випадком падіння рівня радіальних та окружних напружень в бандажі, і, як наслідок, стрімке збільшення значень небезпечних окружних напружень в трубопроводі після релаксації в бандажі – також майже на 20 % для моменту часу $t = 200$ годин, якщо за 100 % брати лише зміну в часі частину напружень.

Висновки. Був розроблений чисельно-аналітичний метод математичного моделювання ортотропної в'язкопружної поведінки матеріалу. Порівняння чисельної моделі із аналітичною дає низьке розходження результатів для невеликої кількості ітерацій, що підтверджує стійкість розробленої моделі. Поширення результатів розрахунків на випадок неоднакових властивостей в'язкопружності у різних напрямках дає великі зміни в кінематиці напружено-деформованого стану конструкції, що підтверджує необхідність застосування описаного методу для більш точного моделювання ефектів в'язкопружності або, принаймні, для оцінки похибки кінцевих результатів, яку вносить неврахування ступеню анізотропії в'язкопружних властивостей, більшого за ступінь анізотропії пружних властивостей. Запропонований чисельно-аналітичний метод може також бути поширений на більш складні математичні моделі без суттєвих змін у його ідеї та основних етапах.

Список літератури: 1. *Pluvinage G.* General Approaches of Pipeline Defect Assessment / *G. Pluvinage* // Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Safety, Reliability and Risks Associated with Water, Oil and Gas Pipelines. – Springer, 2008. – P. 1-22. 2. *Мустафін Ф.М.* Защита трубопроводов от коррозии / *Ф.М. Мустафін, Л.И. Быков.* – М.: Недра, 2007. – Т. 2. – 708 с. 3. *Duell J.M.* Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system / *J.M. Duell, J.M. Wilson, M.R. Kessler* // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – Elsevier, 2008. – P. 782-788. 4. *Meniconi L.* Stress Analysis of Pipelines with Composite Repairs / *Luiz C.M. Meniconi, José L.F. Freire, Ronaldo D. Vieira, Jorge L.C. Diniz* // ASME, 4th International Pipeline Conference; Calgary, Alberta, Canada, 2002. – P. 1-7. 5. *Green M. A.* Using Non-Metallic Composite Material for High Temperature Piping Repairs / *M.A. Green, C.J. Lazzara* // ASME, Proceedings of the 2012 Reliability & Maintenance Conference & Exhibition; San Antonio, Texas, USA, 2012. – P. 1-9. 6. *Ferry J.D.* Viscoelastic Properties of Polymers / *John. D. Ferry.* – Canada, John Wiley & Sons, 1980. – 641 p. 7. *Phan-Thien N.*, Understanding Viscoelasticity: Basics of Rheology / *Nhan Phan-Thien.* – Springer, 2002. – 145 p. 8. *Львов Г.І., Мартиненко В.Г.* Аналітичне дослідження контактної поведінки ділянки трубопроводу з в'язкопружною ремонтною накладкою / *Г.І. Львов, В.Г. Мартиненко* // Вісник НТУ «ХП». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 57 (1099). – С. 49-56. 9. *Работнов Ю.Н.* Ползучесть элементов конструкций / *Ю.Н. Работнов.* – М.: Наука, 1966. – 752 с. 10. *Калиткин Н.Н.* Численные методы / *Н.Н. Калиткин.* – М.: Наука, 1978. – 512 с.

Bibliography (transliterated): 1. Pluvinage G. General Approaches of Pipeline Defect Assessment. G. Pluvinage. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Safety, Reliability and Risks Associated with Water, Oil and Gas Pipelines. Springer, 2008. 1-22 Print. 2. Mustafin F.M. Zashchita truboprovodov ot korrozii. F.M. Mustafin, L.I. Bykov. Moscow: Nedra, 2007. – Vol. 2. –708 Print. 3. Duell J.M. Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system. J.M. Duell, J.M. Wilson, M.R. Kessler. International Journal of Pressure Vessels and Piping. Elsevier, 2008. 782-788 Print. 4. Meniconi L. Stress Analysis of Pipelines with Composite Repairs. Luiz C.M. Meniconi, José L.F. Freire, Ronaldo D. Vieira, Jorge L.C. Diniz. ASME, 4th International Pipeline Conference; Calgary, Alberta, Canada, 2002. 1-7 Print. 5. Green M. A. Using Non-Metallic Composite Material for High Temperature Piping Repairs. M.A. Green, C.J. Lazzara. ASME, Proceedings of the 2012 Reliability & Maintenance Conference & Exhibition; San Antonio, Texas, USA, 2012. 1-9 Print. 6. Ferry J.D. Viscoelastic Properties of Polymers. John. D. Ferry. Canada, John Wiley & Sons, 1980. 641 Print. 7. Phan-Thien N., Understanding Viscoelasticity: Basics of Rheology. Nhan Phan-Thien. Springer, 2002. 145 Print. 8. L'vov H.I., Martynenko V.H. Analiticheske doslidzhennya kontaktnoyi povedinky dilyanky truboprovodu z v'yazkopruzhnoyu remontnoyu nakladkoyu. H.I. L'vov, V.H. Martynenko. Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Dynamika i micnist' mashyn. Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. № 57 (1099). 49-56 Print. 9. Rabortnov Yu.N. Polzuchest' elementov konstrukcij / Yu.N. Rabortnov. Moscow: Nauka, 1966. 752 Print. 10. Kalitkin N.N. Chislennyye metody. N.N. Kalitkin. Moscow: Nauka, 1978. 512 Print.

Поступила (received) 17.11.2014

УДК 62-13:621.816

Г.Ю. МАРТЫНЕНКО, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ»

ИСТОРИЯ, АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ, МЕТОДЫ И СРЕДСТВА АНАЛИЗА ЯВЛЕНИЙ РОТОРНОЙ ДИНАМИКИ С УЧЕТОМ ТРАДИЦИОННЫХ И МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ

Выполнены обзор литературных источников и оценка современного состояния вопросов, относящихся к роторной динамике с учетом использования в роторных системах различных типов подшипников. Рассмотрены причины возникновения различных типов вибраций в роторных машинах и варианты их проявления в зависимости от особенностей системы, способы идентификации этих вибраций и подходы к динамическому анализу. Основное внимание в работе уделено одному из новых типов подшипников, а именно – магнитному подшипнику. Для этого вида опор роторов выполнены обзорные исследования, посвященные классификации существующих типов, изучению особенностей их применения в различных роторных машинах. Проведен анализ источников возникновения и способов математического описания различных динамических явлений, возможных в системах с применением магнитных подшипников. Особое внимание уделено вопросам нелинейной динамики. Определены и систематизированы основные актуальные темы научных исследований в области моделирования динамического поведения роторных систем с магнитными подшипниками.

Ключевые слова: роторная динамика, магнитные подшипники, нелинейные колебания.

© Г.Ю. Мартыненко, 2014