

УДК 621.643.8

Львов Г.І., д.т.н., проф., Мартиненко В.Г.
НТУ «Харківський Політехнічний Інститут», м. Харків, Україна

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТРУБОПРОВОДУ З В'ЯЗКОПРУЖНИМ РЕМОНТНИМ БАНДАЖЕМ НА РІЗНИХ РОБОЧИХ РЕЖИМАХ

Lvov G., Martynenko V.
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A PIPELINE WITH A VISCOELASTIC REPAIR BANDAGE ON DIFFERENT OPERATING MODES

В роботі наведено аналітичні дослідження напружено-деформованого стану ділянки сталевого трубопроводу з в'язкопружним ремонтним бандажем для різних режимів монтажу бандажа та умов зміни тиску у трубопроводі. Повна система рівнянь теорії в'язкопружності для ортотропного матеріалу зведена до інтегро-диференційного рівняння в переміщеннях, та запропоновано метод його розв'язання. Проведено аналіз у часі контактних напружень між трубопроводом та бандажем із врахуванням зміни внутрішнього тиску та впливу в'язкопружних властивостей склопластику.

Ключові слова: трубопровід; ремонтний бандаж; натяг; в'язкопружність; ядра релаксації; ряди Проні; інтегро-диференційне рівняння.

Вступ

Природний газ є одним з найважливіших джерел палива, що має широке промислове та побутове використання. Такий факт обумовлює потребу в його транспортуванні на великі відстані як всередині країни, так і за її межами. Для цього застосовуються сталеві магістральні трубопроводи, які, враховуючи великі значення внутрішнього тиску, є високонавантаженими конструкціями. В таких умовах гостро постає питання щодо їхньої міцності, адже руйнування трубопроводу є не тільки надзвичайно шкідливим економічним, але й життєво небезпечним явищем. Саме тому за нормальних умов такий тип конструкцій частіше за все проектується та працює в рамках пружності з достатньо великим запасом міцності [1]. Але в процесі експлуатації трубопроводу в його стінках можуть виникати локальні дефекти, обумовлені впливом на них корозії, ерозії, механічної дії сторонніх предметів тощо [2]. З точки зору механіки такі дефекти є концентраторами напружень, що можуть спричинити швидке локальне збільшення цих напружень та, як результат, навіть виникнення пластичних деформацій із подальшим зростанням зони пластичності та руйнуванням. Задля запобігання поширення зони дефектів та зниження рівня напружень в цій зоні використовуються різні методи. Серед них поміж інших можна виділити метод нанесення на ділянку трубопроводу з дефектами композитної ремонтної накладки (бандажу) за допомогою спеціально розроблених підходів [3]. Дуже часто композитним матеріалом для виготовлення такого запобіжного засобу є склопластик, який, на відміну від пружного матеріалу трубопроводу, проявляє в'язкопружні властивості. Окрім того, згідно з процедурою ремонту під час його проведення газ із трубопроводу може не спускатись, і він залишається під дією внутрішнього розподіленого тиску. В цьому випадку за умови незмінного порівняно із моментом ремонту тиску композитна накладка виявляється ненапруженою. В іншому випадку ремонтний бандаж може наноситись на проблемну ділянку із натягом, внаслідок чого в ньому виникають напруження та водночас відбувається їхній перерозподіл в трубопроводі. Нарешті існують випадки, в яких газ із трубопроводу під час ремонту спускається й подається знову тільки після ремонту, внаслідок чого відбувається спільне навантаження конструкції із бандажем внутрішнім тиском. За таких умов постає питання адекватного моделювання та аналізу напружено-деформованого стану (НДС) бандажованої ділянки трубопроводу із урахуванням ефектів в'язкопружності композитного матеріалу та процедури й параметрів ремонту, що обов'язково буде потрібно для з'ясування його ефективності або доцільності взагалі. Адже якщо в ході аналізу виявиться, що напруження в трубопроводі після ремонту не знижуються до робочого рівня або контактні напруження між ним та бандажем стануть розтягуючими і перевищать допустимий рівень, що призведе до відриву накладки, то в проект ремонтного з'єднання необхідно буде внести відповідні зміни.

Задача знаходження напружено-деформованого стану в'язкопружних циліндричних тіл для різних випадків знаходила свій розв'язок ще з другої половини минулого сторіччя. Так, в [4] проводиться розв'язання

проблеми навантаження спадково в'язкопружного товстостінного циліндру внутрішнім рівномірно розподіленим тиском. Праця [5] в якості розгляду задачі функціонування ракетного двигуна дає результат знаходження НДС двох навантажених тиском коаксіальних циліндрів, зовнішній з яких є тонкостінним пружним, а внутрішній – товстостінним в'язкопружним, в плоскій постановці.

В той же час достатня увага приділяється й проблемі навантаження внутрішнім тиском відремонтованого трубопроводу. Наприклад, в [6] експериментально та чисельно виконаний порівняльний аналіз НДС ділянки трубопроводу з різними формами дефектів у стінках та пружною ремонтною накладкою. Задача вирішена за допомогою скінченно-елементного аналізу, але в'язкопружні властивості композитного матеріалу не враховуються. Дослідження [7] провадить розгляд аналогічної конструкції, але з врахуванням ефектів пластичних деформацій в зоні дефекту. Робота [8] дає скінченно-різнісний аналіз НДС двох коаксіальних циліндрів із врахуванням ефектів в'язкопружності для біомедичного застосування, але така постановка задачі не може бути поширена на випадки аналізу відремонтованих магістральних трубопроводів. В [9] наводиться експериментальне дослідження в'язкопружної поведінки поліетиленових труб та даються його результати в табличному вигляді.

В [10] детально проаналізований вплив технологічного натягу при монтажі бандажа на ефективність ремонту ділянки трубопроводу. Робота [11] представляє аналітичне дослідження двох циліндрів під дією внутрішнього тиску, де зовнішній циліндр проявляє в'язкопружні властивості, причому математична модель дозволяє враховувати різний вплив таких властивостей на об'ємну та зсувну частину деформації, а розв'язання моделі проводиться за допомогою одностороннього перетворення Лапласа. В [12] наведений тривимірний скінченно-елементний аналіз ділянки трубопроводу, відремонтованої за допомогою в'язкопружного бандажа. Нарешті, [13] дає аналітичний розв'язок для двох навантажених внутрішнім тиском циліндрів, зовнішній з яких є спадково в'язкопружним, в плоскій постановці за допомогою наведеного метода вирішення систем інтегродиференціальних рівнянь.

В даній роботі приведена аналітична модель ділянки трубопроводу з в'язкопружною ремонтною накладкою, яка поміж іншим враховує два важливих аспекти: по-перше, крива в'язкопружності може бути апроксимована експоненціальними рядами Проні, тобто в загальному випадку є довільною; по-друге, вона дозволяє відобразити різні умови монтажу композитної накладки на трубопровід, як то наявність внутрішнього тиску або натягу під час ремонту.

Постановка задачі

Розрахунки напружено-деформованого стану трубопроводу з нанесеною на нього ремонтною накладкою проводяться аналітично в плоскій вісесиметричній постановці за умови сумісного навантаження внутрішнім тиском довгої ділянки трубопроводу та композитної ремонтної накладки. Вважається, що ділянка трубопроводу з накладкою є достатньо довгою для того, щоб на більшій її частині спостерігався напружено-деформований стан, близький до плоского. Впливом дефектів на загальну картину розподілу НДС в конструкції нехтується, оскільки він носить локальний характер та важливий для розгляду задачі з точки зору концентрації напружень. На рисунку 1 наведена розрахункова схема задачі, де трубопровід показаний позначкою (I), а бандаж – (II).

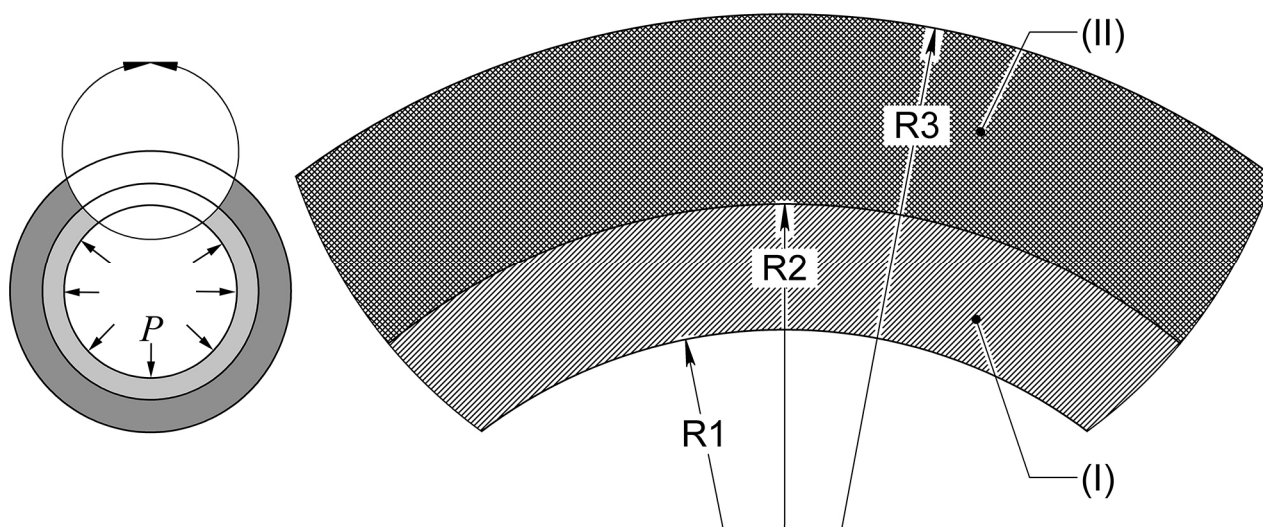


Рис. 1. Розрахункова схема задачі

Трубопровід без бандажу знаходиться під дією внутрішнього розподіленого тиску P_1 , що спричиняє початковий напружено-деформований стан. Радіальне переміщення його зовнішньої поверхні позначено як Δu .

В таких умовах на навантажений трубопровід наноситься бандаж. Після його нанесення внутрішній тиск за порівняно короткий проміжок часу змінюється до значення P_2 .

Сталь вважається пружним однорідним ізотропним матеріалом, а склопластик – в'язкопружним однорідним ортотропним. Враховуючи спрощення основні функції напружено-деформованого стану будуть залежати від однієї просторової змінної – радіальної координати r , до якої із врахуванням ефектів у часі додається змінна часу t , а незалежною кінематичною змінною буде радіальне переміщення трубопроводу та бандажу u . Така постановка задачі, з урахуванням описаних нюансів 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 в'язкопружної поведінки ремонтного бандажу, нанесеного на трубопровід, та дослідження впливу монтажних особливостей накладки на кінематику НДС конструкції.

Теоретичні положення

Запишемо згідно з [14] систему рівнянь теорії в'язкопружності в полярній системі координат для випадку ортотропного матеріалу, матриці пружних та в'язких властивостей якого є рівними з точністю до скалярного множника, в плоскій вісесиметричній постановці:

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

де r – радіальна координата; t – координата часу; s – час, що сплинув; u – радіальне переміщення; ε_r , ε_θ – 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 (склопластику), що можуть бути виражені через модулі пружності та коефіцієнти Пуассона; (I) , (II) – позначки для матеріалу трубопроводу та матеріалу бандажу відповідно; $K(t-s)$ – в'язкопружне ядро релаксації, що представлено рядами Проні:

$$K(t-s) = \sum_{i=1}^n a_i \exp(-b_i(t-s)), \quad (2)$$

де a_i , b_i – відповідно коефіцієнти та показники ряду Проні, n – кількість членів ряду Проні.

Для випадку ізотропного пружного матеріалу система (1) може бути спрощена:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\sigma_r^{(I)}(r,t)}{dr} + \frac{\sigma_r^{(I)}(r,t) - \sigma_\theta^{(I)}(r,t)}{r} = 0 \\ \varepsilon_r^{(I)}(r,t) = \frac{du^{(I)}(r,t)}{dr} \\ \varepsilon_\theta^{(I)}(r,t) = \frac{u^{(I)}(r,t)}{r} \\ \sigma_r^{(I)}(r,t) = B_{11}\varepsilon_r^{(I)}(r,t) + B_{12}\varepsilon_\theta^{(I)}(r,t) \\ \sigma_\theta^{(I)}(r,t) = B_{21}\varepsilon_r^{(I)}(r,t) + B_{22}\varepsilon_\theta^{(I)}(r,t) \end{array} \right. , \quad (3)$$

де $B_{11} = B_{22}$, $B_{12} = B_{21}$ – коефіцієнти матриці жорсткості ізотропного матеріалу (сталі), що можуть бути виражені через модуль пружності та коефіцієнт Пуассона.

Таким чином система (3) буде відповідати НДС внутрішнього сталевго циліндру (трубопроводу), а система (1) – зовнішнього склопластикового (бандажу). При цьому система (3) може бути зведена до диференційного рівняння в переміщеннях (рівняння Ламе):

$$\frac{d^2u^{(I)}(r,t)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du^{(I)}(r,t)}{dr} - \frac{u^{(I)}(r,t)}{r^2} = 0, \quad (4)$$

рішення якого запишеться у вигляді:

$$u^{(I)}(r,t) = A_1(t)r + A_2(t)/r, \quad (5)$$

а система (1) за аналогією представляється інтегро-диференціальним рівнянням в переміщеннях:

$$\left[\frac{d^2 u^{(II)}(r,t)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du^{(II)}(r,t)}{dr} - \gamma^2 \frac{u^{(II)}(r,t)}{r^2} \right] - \int_0^t K(t-s) \left[\frac{d^2 u^{(II)}(r,s)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du^{(II)}(r,s)}{dr} - \gamma^2 \frac{u^{(II)}(r,s)}{r^2} \right] ds = 0, \quad (6)$$

яке матиме наступний тривіальний розв'язок:

$$\frac{d^2 u^{(II)}(r,t)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du^{(II)}(r,t)}{dr} - \gamma^2 \frac{u^{(II)}(r,t)}{r^2} = 0, \quad (7)$$

де $\gamma^2 = C_{22}/C_{11}$.

Розв'язок диференційного рівняння (7) буде мати наступний вигляд:

$$u^{(II)}(r,t) = A_3(t)r^\gamma + A_4(t)r^{-\gamma}. \quad (8)$$

Коефіцієнти $A_1(t)$, $A_2(t)$, $A_3(t)$, $A_4(t)$, які містяться у виразах для переміщень (5) та (8), – це незалежні функції часу, що з'являються під час інтегрування відповідних диференціальних рівнянь. Вони можуть бути знайдені з відповідних конструкції граничних умов та умов спряженості, які, в свою чергу, й будуть визначати особливості її навантаження та монтажу:

$$\begin{cases} \sigma_r^{(I)}(R_1, t) = -P_2 \\ u^{(I)}(R_2, t) - \Delta u = u^{(II)}(R_2, t) \\ \sigma_r^{(I)}(R_2, t) = \sigma_r^{(II)}(R_2, t) \\ \sigma_r^{(II)}(R_3, t) = 0 \end{cases}. \quad (9)$$

Варто відмітити, що умова спряженості за переміщеннями відповідає за наявність в конструкції монтажних особливостей. Як було показано в постановці задачі, абсолютна різниця між переміщеннями зовнішньої поверхні трубопроводу та внутрішньої поверхні бандажу Δu визначається за допомогою аналітичного знаходження НДС трубопроводу без бандажу при навантаженні його початковим внутрішнім тиском P_1 , тобто як розв'язок крайової задачі:

$$\frac{d^2 u_{init}^{(I)}(r,t)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_{init}^{(I)}(r,t)}{dr} - \frac{u_{init}^{(I)}(r,t)}{r^2} = 0, \quad (10)$$

$$\begin{cases} \sigma_{r_{init}}^{(I)}(R_1) = -P_1 \\ \sigma_{r_{init}}^{(I)}(R_2) = 0 \end{cases}. \quad (11)$$

Отже $\Delta u = u_{init}^{(I)}(R_2)$.

Таким чином, після розв'язання крайової задачі (10)-(11) граничні умови (9) стають повністю визначеними, що дає можливість з урахуванням залежностей для радіальних переміщень з (1) та (3) застосувати їх до системи розв'язків, складеної з виразів (5) та (8). В результаті отримаємо змішану систему алгебраїчних та інтегральних рівнянь відносно функцій часу $A_1(t)$, $A_2(t)$, $A_3(t)$, $A_4(t)$. В процесі її розв'язання виникає необхідність знаходження рішення неоднорідного інтегрального рівняння Вольтерри другого роду [15]:

$$A_3(t) = \bar{\delta} + \bar{a} \int_0^t K(t-s) A_3(s) ds, \quad (12)$$

можливість аналітичного вирішення якого вручну методом диференціювання для випадку наявності у ряді Проні (2) лише одного члену (тобто для $n = 1$) була продемонстрована в [13]. Для випадків двох та більше членів у ряді Проні такий аналітичний розв'язок є дуже громіздким та може бути знайдений за допомогою сучасних потужних комп'ютерних комплексів математичного аналізу [16].

Відтак, знайшовши невідомі константи інтегрування диференціальних рівнянь, маємо повністю визначений аналітичний вигляд радіальних переміщень (5) та (8), що в поєднанні із системами (1) та (3) дає всю інформацію про плоский вісесиметричний напружено-деформований стан в конструкції, що розглядається.

Результати та обговорення

Розглянемо ситуацію, при якій в'язкопружний бандаж без натягу наноситься на навантажений внутрішнім тиском ($P = P_1$) трубопровід. В такому випадку при збереженні робочого тиску НДС в композитній накладці відсутній. Якщо ж газ у трубопроводі буде спущений й внутрішній тиск ($P = P_2$) стане нульовим, це призведе до перерозподілу напружень та деформацій у ділянці, що ремонтується. Відтак навіть за відсутності внутрішнього тиску в трубопроводі НДС загальної конструкції не буде нульовим, а основну увагу представлятимуть контактні напруження між трубопроводом та накладкою, що можуть перевищити границю адгезійної міцності клейового шару. Внаслідок цього бандаж відділиться від трубопроводу, що при першому ж спуску газу зробить весь ремонт даремним.

Фізичні, геометричні та силові характеристики конструкції мають наступні значення:

$$\begin{aligned} R_1 &= 0.510 \text{ [м]}, R_2 = 0.522 \text{ [м]}, R_3 = 0.572 \text{ [м]}; \\ B_{11} &= B_{22} = 23.08 \cdot 10^{10} \text{ [Па]}, B_{12} = B_{21} = 6.92 \cdot 10^{10} \text{ [Па]}; \\ C_{11} &= 87.57 \cdot 10^8 \text{ [Па]}, C_{22} = 131.35 \cdot 10^8 \text{ [Па]}, C_{12} = C_{21} = 31.52 \cdot 10^8 \text{ [Па]}; \end{aligned}$$

$$P_1 = 5 \cdot 10^6 \text{ [Па]}, P_2 = 0 \text{ [Па]}.$$

При цьому в'язкопружні властивості склопластику моделюються кривою, відображеною за допомогою одночленового ряду Проні із наступними коефіцієнтами, які відповідають даним, що були використані в [13]:

$$a = 0.002 \text{ [-]}, b = 0.003 \text{ [-]}.$$

На рисунку 2 показані залежності основних характеристик НДС конструкції від радіальної координати для початкового моменту (суцільні лінії) та для часу релаксації (пунктирній лінії) після повного спуску газу в трубопроводі. Криві, що відповідають характеристикам трубопроводу, нанесені на графіки в межах $[R_1, R_2]$, а бандажу – в межах $[R_2, R_3]$. Як можна побачити з рисунку 2б, рівень контактного напруження для початкового часу складає 0.87 МПа.

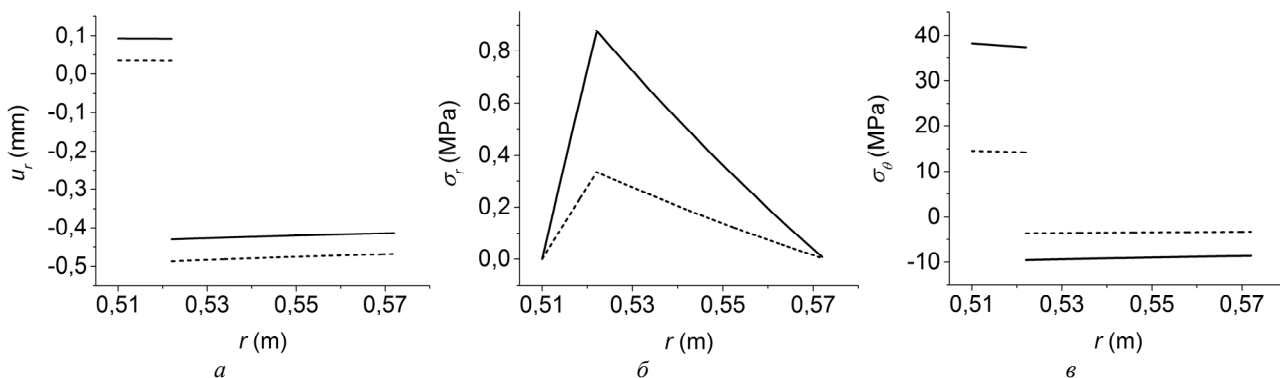


Рис. 2. Залежність радіальних переміщень (а), радіальних (б) та окружних (в) напружень від радіальної координати для початкового моменту та часу релаксації при внутрішньому тиску $P = P_2 = 0$ [Па]

Релаксацію цього напруження у часі під дією в'язкопружних властивостей склопластику є можливість простежити на рисунку 3. Як можна побачити з графіку, час релаксації напружень складає приблизно 2000 годин, що співпадає із відповідним значенням, отриманим в [13], а рівень контактного напруження в цей момент складає приблизно 0.33 МПа, що на 62 % менше від відповідного результату для пружного розв'язку.

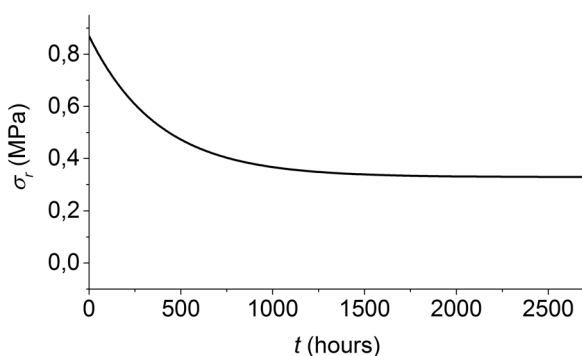


Рис. 3. Залежність контактного напруження від часу (в годинах) при внутрішньому тиску $P = P_2 = 0$ [Па]

Таким чином при наявності чисельного рівня контактних напружень між сталевим трубопроводом та склопластиковим бандажем можливо оцінити міцність не лише цих конструктивних елементів, але й з'єднання між ними. Результати такої оцінки з точки зору довговічності під впливом в'язкопружності можуть бути скореговані за допомогою розгляду зазначених величин у часі.

Варто відмітити, що описана аналітична модель дозволяє враховувати не лише нанесення бандажу на навантажений трубопровід, а й його монтаж із натягом, якщо в якості Δu прийняти від'ємну величину, яка за абсолютним значенням дорівнює різниці між зовнішнім радіусом трубопроводу та внутрішнім радіусом накладки за умови відсутності в них напружень. Окрім цього можливі різні комбінації згаданих ефектів.

Також дана модель може бути поширена на матеріал, матриці пружних та в'язких властивостей якого є незалежними, за допомогою методу, що базується на чисельно-аналітичному вирішенні інтегро-диференціальних рівнянь, описаному в роботі [17].

Висновки

Розроблена математична модель напружено-деформованого стану навантаженої внутрішнім тиском довгої ділянки сталевго трубопроводу із нанесеним на неї композитним бандажем дозволяє враховувати вплив на нього таких особливостей, як виражені за допомогою рядів Проні в'язкопружні властивості ортотропного матеріалу, матриці пружних та в'язких властивостей якого є рівними з точністю до скалярного множника, навантаженість трубопроводу під час нанесення на нього ремонтної накладки та її монтаж із натягом. Слід

зазначити, що врахування вищезазначених монтажних умов при чисельному вирішенні задачі за допомогою комп'ютерних скінченно-елементних комплексів є доволі складною та ресурсомісткою процедурою, яка, на додачу, ще й володіє певним рівнем похибки. Наведена аналітична модель, укладена в результаті в декількох математичних виразах, надає широкі можливості оцінки НДС конструкції із врахуванням вказаних особливостей, що, безсумнівно, дає їй велику перевагу над використанням скінченно-елементних підходів при проведенні експрес-аналізів ремонту магістральних трубопроводів. Приведені графіки зміни основних параметрів НДС за радіусом та у часі, зокрема, графік зміни у часі контактних напружень під впливом в'язкопружності після зниження тиску в трубопроводі, наочно ілюструють вищезазначені можливості розробленого підходу.

Аннотация. В работе приведены аналитические исследования напряженно-деформированного состояния участка стального трубопровода с вязкоупругим ремонтным биндажом для разных режимов монтажа биндажа и условий изменения давления в трубопроводе. Полная система уравнений теории вязкоупругости для ортотропного материала сведена к интегро-дифференциальному уравнению в перемещениях, и предложен метод его решения. Проведен анализ во времени контактных напряжений между трубопроводом и биндажом с учетом изменения внутреннего давления и влияния вязкоупругих свойств стеклопластика.

Ключевые слова: трубопровод; ремонтный биндаж; натяг; вязкоупругость; ядра релаксации; ряды Прони; интегро-дифференциальное уравнение.

Abstract. The following paper shows an analytical study on the stress-strain state of a steel elastic pipeline section with a fiberglass viscoelastic repair bandage. The aim of the study is to develop an approach to adequate mathematical modeling of viscoelasticity, considering conditions of an installation of the bandage on a loaded pipeline and a tension in it. An original method of a formation of an integral-differential equation in terms of displacements, gained from the full system of equations of viscoelasticity theory for the plane axisymmetric orthotropic case in polar coordinates, allows discovering and exploring such phenomena as stress relaxation in the bandage and their growth in the pipeline section. The developed approach also lets solve obtained boundary value problem analytically. The proposed set of boundary and conjugation conditions reflects different repair and operational modes. An analytical model enables to consider and examine an influence of the prestress conditions in the pipe on a stress-strain state kinetics as well as a change of contact stress due to viscoelastic properties of fiberglass and different values of an initial pressure.

Keywords: pipeline; repair bandage; tension; viscoelasticity; relaxation kernels; Prony series; integral-differential equation.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Бородавкин П. П. Сооружение магистральных трубопроводов / П. П. Бородавкин, В. Л. Березин. – М.: Недра, 1977. – 407 с.
2. Алиев Р. А. Сооружение и ремонт газонефтепроводов, газохранилищ и нефтебаз / Р. А. Алиев. – М.: Недра, 1987. – 271 с.
3. Мустафин Ф. М. Защита трубопроводов от коррозии / Ф. М. Мустафин, Л. И. Быков. – М.: Недра, 2007. – 620 с.
4. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
5. Москвитин В. В. Сопrotивление вязкоупругих материалов применительно к зарядам ракетных двигателей на твердом топливе / В. В. Москвитин. – М.: Наука, 1972. – 327 с.
6. Duel J. M., Wilson J. M., Kessler J. M., Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Elsevier, 2008, pp. 782-788.
7. Meniconi L., Freire J., Vieira R., Diniz J., Stress analysis of pipelines with composite repairs. ASME, 4th International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2002, pp. 1-7.
8. Muliana A., Rajagopal K. R., On the response of viscoelastic biodegradable polymeric solids. Mechanics Research Communications 39, Elsevier, 2012, pp. 51-58.
9. Ivanov S. G., Anoshkin S. G., Zuyko V. Yu., Viscoelastic behavior and durability of steelwire-reinforced polyethylene pipes under a high internal pressure. Mechanics of Composite Materials, 2011, vol. 47, no 2, pp. 194-202.
10. Lvov G. I., Barkanov E., Beschtnikov D., Impact of technological tension on the efficiency of pipelines reinforcement by composite bandages. Mechanics of composite materials, Riga, 2015, vol. 50, no. 6, 12 pp.
11. Львов Г. И. Исследование вязкоупругого деформирования составного цилиндра / Г. И. Львов, В. Г. Сукиасов // – Вестник НТУ «ХПИ»: серія «Динаміка і прочність машин». – 2013. – № 58. – С. 119-124.
12. Львов Г. И. Особливості моделювання та аналізу ділянок трубопроводів з експлуатаційними дефектами та в'язкопружними ремонтними накладками / Г. И. Львов, В. Г. Мартиненко // – Вісник НТУ «ХПИ»: серія «Динаміка та міцність машин». – 2013. – № 63. – С. 81-90.
13. Львов Г. И. Аналітичне дослідження контактної поведінки ділянки трубопроводу з в'язкопружною ремонтною накладкою / Г. И. Львов, В. Г. Мартиненко // – Вісник НТУ «ХПИ»: серія «Динаміка та міцність машин». – 2014. – № 57. – С. 49-56.
14. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука, 1966. – 752 с.
15. Краснов М. Л. Интегральные уравнения / М. Л. Краснов, А. И. Киселев, Г. И. Макаренко. – М.: Наука, 1968. – 192 с.
16. Манзон Б. М. Maple Power Edition / Б. М. Манзон. – М.: Филлин, 1998. – 240 с.

17. *Львов Г. І.* Чисельно-аналітичне дослідження ортотропної в'язкопружності склопластику на прикладі ремонтної накладки магістрального трубопровода / Г. І. Львов, В.Г. Мартиненко // – Вісник НТУ «ХПІ»: серія «Динаміка та міцність машин». – 2014. – № 58. – С. 68-77.

References

1. *Borodavkin P. P., Berezin V.L.,* Sooruzheniye magistral'nykh truboprovodov [Construction of main pipelines]. Moscow: Nedra, 1977, 407 pp.
2. *Aliyev R. A.,* Sooruzheniye i remont gazonefteprovodov, gazokhranilishch i neftebaz [Construction and repair of pipelines, gas storage facilities and tank farms]. Moscow: Nedra, 1987, 271 pp.
3. *Mustafin F. M., Bykov L. I.,* Zashchita truboprovodov ot korrozii [Pipeline corrosion protection]. Moscow: Nedra, 2007, 620 pp.
4. *Malinin N. N.,* Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti [Applied theory of plasticity and creep]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1975, 400 pp.
5. *Moskvitin V.V.,* Soprotivleniye vyazkoprugikh materialov primenitel'no k zaryadam raketnykh dvigateley na tverdom toplive [Resistance of viscoelastic materials applied to the charges of rocket engines on solid fuel]. Moscow: Nauka, 1972, 327 pp.
6. *Duel J. M., Wilson J. M., Kessler J. M.,* Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Elsevier, 2008, pp. 782-788.
7. *Meniconi L., Freire J., Vieira R., Diniz J.,* Stress analysis of pipelines with composite repairs. ASME, 4th International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2002, pp. 1-7.
8. *Muliana A., Rajagopal K. R.,* On the response of viscoelastic biodegradable polymeric solids. Mechanics Research Communications 39, Elsevier, 2012, pp. 51-58.
9. *Ivanov S. G., Anoshkin S. G., Zuyko V. Yu.,* Viscoelastic behavior and durability of steelwire-reinforced polyethylene pipes under a high internal pressure. Mechanics of Composite Materials, 2011, vol. 47, no 2, pp. 194-202.
10. *Lvov G. I., Barkanov E., Beschtnikov D.,* Impact of technological tension on the efficiency of pipelines reinforcement by composite bandages. Mechanics of composite materials, Riga, 2015, vol. 50, no. 6, 12 pp.
11. *Lvov G. I., Sukiasov V. G.,* Issledovaniye vyazkoprugogo deformirovaniya sostavnogo tsilindra [Investigation of viscoelastic deformation of the composite cylinder]. Journal of Dynamics and Strength of Machines of NTU «KhPI», 2013, no 58, pp. 119-124.
12. *Lvov G. I., Martynenko V. G.,* Osoblyvosti modelyuvannya ta analizu dilyanok truboprovodiv z ekspluatatsiynymy defektamy ta v'yazkopruzhnymy remontnymy nakladkamy [Features of modeling and analysis of pipe sections with operational defects and repair viscoelastic plates]. Journal of Dynamics and Strength of Machines of NTU «KhPI», 2013, no 63, pp. 81-90.
13. *Lvov G. I., Martynenko V. G.,* Analitichne doslidzhennya kontaktnoyi povedinky dilyanky truboprovodu z v'yazkopruzhnoyu remontnoyu nakladkoyu [Analytical study of contact behavior of a section of a pipeline with a viscoelastic repair layer]. Journal of Dynamics and Strength of Machines of NTU «KhPI», 2014, no 57, pp. 49-56.
14. *Rabotnov Yu. N.,* Polzuchest' elementov konstruksiy [Creep of structural elements]. Moscow: Nauka, 1966, 752 pp.
15. *Krasnov M. L., Kiselov A. I., Makarenko G. I.,* Integral'nyye uravneniya [Integral equations]. Moscow: Nauka, 1968, 192 pp.
16. *Manzon B M.,* Maple Power Edition. Moscow: Filin, 1998, 240 pp.
17. *Lvov G. I., Martynenko V. G.,* Chisel'no-analitichne doslidzhennya ortotropnoyi v'yazkopruzhnosti skloplastiku na prykladi remontnoyi nakladky magistral'nogo truboprovoda [Numerical-analytical study of orthotropic viscoelasticity of fiberglass illustrated by repair layer of main pipeline]. Journal of Dynamics and Strength of Machines of NTU «KhPI», 2014, no 58, pp. 68-77.

Подана до редакції 12.03.2015