

Я.В. Дорошенко, А.П. Олійник, О.М. Карпаш

Моделювання напружено-деформованого стану ерозійно-корозійно зношених трубопровідних систем

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна,
ya.doroshenko@nung.edu.ua*

Задачі моделювання напружено-деформованого стану ерозійно чи корозійно зношених прямолинійних ділянок та тороподібних відводів трубопровідних систем запропоновано розв'язувати в циліндричній системі координат. Для цього записано формули Кристофеля II роду, ненульові компоненти тензора деформацій та систему рівнянь рівноваги в рамках лінійної теорії крученості. Систему рівнянь рівноваги зведено до одного рівняння, яке є основним рівнянням задачі Ламе. Виведено формули для розрахунку кільцевих напружень, які виникають у стінці ерозійно чи корозійно зношених прямолинійних ділянок, відводів трубопроводів від дії внутрішнього тиску. Визначено вплив зміни товщини стінки відводів трубопроводів в місці їх ерозійного чи корозійного зношення на величину кільцевих напружень.

Ключові слова: кільцеві напруження, ерозія, корозія, відвід трубопроводу, внутрішній тиск, циліндрична система координат.

Стаття поступила до редакції 15.01.2020; прийнята до друку 15.03.2020.

Вступ

Сучасні трубопровідні системи є складними мережами, які складається з прямих ділянок, кривих гарячого (відводів) і холодного гнуття, трійників, перехідників. Відводи містять трубопроводи різного призначення (газопроводи, нафтопроводи, нафтопродуктопроводи, азотопроводи, паропроводи атомних і теплових електричних станцій, трубопроводи пневмотранспорту тощо). Найбільша кількість відводів міститься в об'язці різноманітних технологічних об'єктів, компресорних та насосних станцій, підземних сховищ газу, газорозподільних станцій тощо. Відводи містять Г-, Z- і П-подібні компенсатори надземних трубопроводів, вони є в місцях різких зломів рельєфу місцевості, різких поворотів траси трубопроводу тощо.

У відводах трубопроводів змінюється напрям руху потоку на кут 45°, 60°, 90°, відбувається ударяння частинок, які містяться у потоці транспортованого продукту до стінки відводу, що зумовлює ерозійне зношування (рис. 1, а). Під дією агресивних забруднень, які містяться в

трубопровідних потоках, відбувається корозійне зношування внутрішньої стінки трубопроводів, а під дією агресивних компонентів, які містяться в довкіллі – корозійне зношування зовнішньої стінки (рис. 1,б). Зовнішні і внутрішні дефекти прямолинійних ділянок, відводів трубопроводів впливають на їх напружено-деформований стан.

Одними з вимог, які ставляться до трубопроводів для забезпечення їх надійності є контролювання під час експлуатації трубопроводу за зміною величини ерозійних та корозійних дефектів стінки, максимально точно визначення напруженого стану дефектних ділянок.

Щоб дослідити напружено-деформований стан ерозійно та корозійно зношених трубопроводів треба виявити та математично описати фактори силового впливу, які діють під час експлуатації трубопроводів.

Численні публікації, як правило, стосуються або оцінки зміни напружено-деформованого стану ділянок трубопроводів за даними про переміщення точок поверхні під дією силових факторів невідомої природи [1-6], або визначення кільцевих напружень у стінці ерозійно зношених ділянок трубопроводів, які зумовлені дією внутрішнього тиску [5, 7-10] чи



Рис. 1. Дефекти відводів трубопроводів: а) – ерозія; б) – корозія.

еквівалентних напружень комп'ютерним моделюванням методом скінчених елементів [11-13]. Питання комплексної оцінки зміни напружено-деформованого стану під дією комплексу силових факторів різної природи вимагають більш детального їх вивчення, урахування кривизни осі квазіпрямолінійних та тороподібних ділянок трубопроводу (відводів гарячого гнугтя), ерозійного та корозійного зношення, яке обумовлює зменшення товщини стінки.

Цілями статті є розроблення математичних моделей процесу деформування та напруженого стану прямолінійних ділянок і відводів трубопроводів за даними про переміщення точок їх

зовнішньої поверхні та про зміну конфігурації поперечного перерізу зумовлену ерозійним та корозійним зношенням.

I. Теоретична модель

Для опису зміни напружено-деформованого стану трубопроводів за даними переміщення точок поверхні застосовується методика, що отримала теоретичне обґрунтування в роботах [1, 2], згідно з якими для координат радіус-вектора \vec{r} будь-якої точки досліджуваної ділянки одержується подання:

$$\vec{r}(s, \varphi, r, t, p_i) = \vec{r}_i(s, \varphi, r, t, p_i) + \rho(s, \varphi, r, t, p_i) \times (\cos \omega(s, \varphi, r, t, p_i) \vec{b}_i + \sin \omega(s, \varphi, r, t, p_i) \vec{n}_i) + \psi(s, \varphi, r, t, p_i) \cdot \vec{\tau}_i - \frac{D}{2} \vec{n}_i, \quad (1)$$

де s, φ, r – компоненти пов'язаної з тілом квазіциліндричної системи координат (s – повздожні координати, $0 \leq s \leq l$; φ – полярний кут в перерізі $0 \leq \varphi \leq 2\pi$; r – радіальна компонента, $R_{вн} \leq r \leq R_{зовн}$); l – довжина ділянки; $R_{вн}, R_{зовн}$ – відповідно внутрішній та зовнішній радіуси труби; t – час; p_i – коефіцієнти, що враховують тип зовнішніх навантажень (внутрішній тиск, кручення, повздожні переміщення, температурні градієнти тощо); \vec{r}_i – радіус-вектор точки на верхній твірній ділянки трубопроводу (для побудови \vec{r}_i за даними про переміщення точок верхньої твірної використовуються інтерполяційні згладжуючі сплайни [1, 2] з урахуванням точності вимірювання координат геодезичними [6, 14] методами або методами внутрішньотрубної інспекції [9, 15, 16]; $\vec{n}_i, \vec{b}_i, \vec{\tau}_i$ – вектори нормалі, бінормалі та дотичної до поверхні твірної [17, 18]; $\rho(s, \varphi, r, t, p_i), \omega(s, \varphi, r, t, p_i), \psi(s, \varphi, r, t, p_i)$ – функції, що характеризують відповідно радіальні, полярні та повздожні переміщення точок досліджуваної ділянки (для прямолінійної ділянки трубопроводу приймається, що $\rho(s, \varphi, r, t, p_i) = r, \omega(s, \varphi, r, t, p_i) = \varphi, \psi(s, \varphi, r, t, p_i) = 0$;

D – зовнішній діаметр трубопроводу. Для більш складних деформацій вказані функції або задаються з урахуванням способу деформування, або ж приймається, що вони є лінійними комбінаціями компонентів s, φ, r , а коефіцієнти розкладу визначаються за методом мінімальних нев'язок [1].

За відомим поданням (1) визначаються наступні величини:

– компоненти векторів локального базису в початковий та контрольний моменти часу [19]:

$$\vec{f}_i = \frac{\partial \vec{r}}{\partial x_i}; \quad x_1 = s; \quad x_2 = \varphi; \quad x_3 = r; \quad (2)$$

– компоненти метричного тензора в початковий та контрольний моменти часу [6]:

$$g_{ij} = \frac{\partial \vec{r}}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial \vec{r}}{\partial x_j} = \vec{f}_i \cdot \vec{f}_j; \quad (3)$$

– компоненти тензора деформацій [17]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (g_{ij} - g_{ij}^0), \quad (4)$$

де g_{ij}, g_{ij}^0 – компоненти метричного тензора в початковий та контрольний моменти часу;

– компоненти тензора напружень σ_{ij} у рамках моделі ізотропного тіла [19]:

$$\sigma^{ij} = \lambda I_1(\varepsilon) g^{ij} + 2\mu \varepsilon^{ij}, \quad (5)$$

де $\sigma^{ij}, g^{ij}, \varepsilon^{ij}$ – відповідно контраваріантні компоненти тензорів напруження, метричного та тензора деформації.

Компоненти g^{ij} визначаються множенням матриці, оберненої до $\{g^{ij}\}$, визначеної за (3). Для інших контраваріантних компонент [17], відоме співвідношення між коваріантними та контраваріантними компонентами тензорів [17]:

$$\begin{cases} \sigma^{ij} = \sum_{k,l=1}^3 g^{ik} g^{jl} \sigma_{kl}, \\ \varepsilon^{ij} = \sum_{k,l=1}^3 g^{ik} g^{jl} \varepsilon_{kl}, \end{cases} \quad (6)$$

У випадку анізотропного тіла [19] компоненти тензора напружень визначається наступним чином:

$$\sigma_{ij} = \sum_{k,l=1}^3 c_{ijkl} \varepsilon_{kl}, \quad (7)$$

де c_{ijkl} – компоненти матриці круглих модулів.

Модель (1)-(7) дозволяє оцінити зміну напружено-деформованого стану при зміні координат точок внутрішньої поверхні трубопроводу.

У місцях криволінійних ділянок трубопроводів, тороподібних відводів, трубопровід зазнає особливо значного ерозійного зношування в результаті чого зменшується товщина стінки.

При моделюванні напруженого стану ділянок трубопроводу із змінною формою поперечного перерізу (ерозійним чи корозійним зношенням стінки) задача оцінки напружено-деформованого стану розв'язується в циліндричній системі координат з наступними допущеннями:

$$\begin{cases} x = r \cos \varphi & 0 \leq \varphi \leq 2\pi \\ y = r \sin \varphi & R_{\text{вн}} \leq r \leq R_{\text{зовн}} \\ z = s & 0 \leq s \leq L \end{cases}, \quad (8)$$

для яких символи Кристофеля II роду [17] мають лише дві ненульові компоненти:

$$\Gamma_{22}^1 = -r; \Gamma_{12}^2 = \Gamma_{21}^2 = \frac{1}{r}.$$

При цьому для компонент вектора переміщень робиться допущення:

$$\begin{cases} \omega_1 = \omega(r, \theta) \\ \omega_2 = v(r, \theta) \\ \omega_3 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Ненульовими компонентами тензора деформацій будуть наступні:

$$\begin{cases} \varepsilon_{11} = \frac{\partial \omega}{\partial r}; \varepsilon_{22} = \frac{\partial v}{\partial \theta} + \omega r; \varepsilon_{33} = 0; \varepsilon_{13} = 0 \\ \varepsilon_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial \omega}{\partial \theta} - 2v \frac{1}{r} \right); \varepsilon_{23} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

У такому випадку система рівнянь рівноваги в рамках лінійної теорії крученості для визначення компонент ω, v набуває наступного виду:

$$\begin{cases} \left(\lambda + 2\mu \right) \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} - \frac{\omega}{r^2} \right) - \lambda \left[\frac{\partial v}{\partial \theta} \frac{2}{r^3} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} \right] + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial r \partial \theta} \frac{1}{r^2} + 2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial \theta^2} \frac{1}{r^2} - \frac{4}{r^3} \frac{\partial \omega}{\partial \theta} - 2 \frac{\partial v}{\partial \theta} \frac{1}{r^4} \right] = 0 \\ -4\mu \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial \omega}{\partial \theta} - 2v \frac{1}{r} \right) \frac{1}{r^3} \right] + \frac{2\mu}{r^2} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial \theta^2} - 2 \frac{\partial v}{\partial r} \frac{1}{r} - \frac{2v}{r^2} \right) \right] + \\ + 2\mu \left(\frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial r \partial \theta} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial r \partial \theta} - \frac{2}{r} \frac{\partial v}{\partial r} \right) \frac{1}{r^2} + \frac{3\mu}{r^3} \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial \omega}{\partial \theta} - \frac{2v}{r} \right) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

З граничними умовами:

$$\begin{cases} \sigma^{22} \Big|_{r=R_{\text{вн}}} = P_{\text{вн}} \\ \sigma^{22} \Big|_{r=R_{\text{зовн}}} = P_{\text{зовн}} \end{cases}, \quad (12)$$

де $P_{\text{вн}}, P_{\text{зовн}}$ – відповідно внутрішній та зовнішній тиск.

Аналогічно для тороподібних відводів трубопроводу вводиться система координат за наступними співвідношеннями:

$$\begin{cases} x = (R + r \cos \varphi) \cos \theta \\ y = (R + r \cos \varphi) \sin \theta \\ z = r \sin \varphi \end{cases}, \quad (13)$$

де R – радіус згину тороподібного відводу.

Формули Кристофеля II роду визначаються наступним чином:

$$\begin{cases} \Gamma_{33}^1 = \cos \theta (R - r \cos \theta); \Gamma_{22}^1 = -r; \Gamma_{12}^2 = \Gamma_{21}^2 = \frac{1}{r} \\ \Gamma_{33}^2 = -\frac{\sin \theta (R - r \cos \theta)}{r}; \Gamma_{13}^3 = -\frac{\cos \theta}{R - r \cos \theta} \\ \Gamma_{23}^3 = \frac{r \sin \theta}{R - r \cos \theta} \end{cases} \quad (14)$$

Ненульові компоненти тензора деформацій ε наступними:

$$\begin{cases} \varepsilon_{11} = \frac{\partial u}{\partial r}; \varepsilon_{22} = \frac{\partial v}{\partial \theta} + ur \\ \varepsilon_{33} = -u \cos \theta (R - r \cos \theta) + v \frac{\sin \theta (R - r \cos \theta)}{r} \\ \varepsilon_{12} = \frac{1}{2} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{v}{r} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} u = u(r, \theta) \\ v = v(r, \theta) \\ \omega = 0 \end{cases} \quad (16)$$

у допущенні:

У такому випадку система рівнянь рівноваги відносно компонент $u(r, \theta)$; $v(r, \theta)$ записується наступним чином:

$$\begin{cases} (\lambda + 2\mu) \left[\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{\partial u}{\partial r} \frac{1}{r} - \frac{u}{r^2} \right] + \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} \mu \frac{1}{r^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial r \partial \theta} \left(\lambda \frac{1}{r^2} + \mu \frac{1}{r^2} \right) + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u}{\partial r} \frac{\cos \theta}{(R - r \cos \theta)} + \\ + \mu \frac{\partial u}{\partial \theta} \frac{\sin \theta}{r(R - r \cos \theta)} + \frac{\partial v}{\partial r} (\lambda + 2\mu) \frac{\sin \theta}{r(R - r \cos \theta)} - 2 \frac{\partial v}{\partial \theta} (\lambda + 2\mu) \cdot \frac{1}{r^3} + \\ + u \left(-\frac{1}{r^2} (\lambda + 2\mu) - (\lambda + 2\mu) \frac{\cos^2 \theta}{(R - r \cos \theta)^2} \right) + v \left[(\lambda + 2\mu) \frac{\sin \theta \cos \theta}{r(R - r \cos \theta)^2} - \frac{\sin \theta (\lambda + 2\mu)}{r^2 (R + r \cos \theta)} \right] = 0 \\ \frac{\partial^2 u}{\partial r \partial \theta} (\lambda + \mu) \frac{1}{r^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} \mu \frac{1}{r^2} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} \frac{1}{r^4} + \frac{\partial u}{\partial \theta} \left(3\mu \frac{1}{r^3} + \lambda \frac{1}{r^3} - \frac{(\lambda + \mu) \cos \theta}{r^2 (R + r \cos \theta)} \right) + \\ + \frac{\partial v}{\partial r} \left(-\mu \frac{1}{r^3} - \mu \frac{1}{r^2} \frac{\cos \theta}{R - r \cos \theta} \right) + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v}{\partial \theta} \frac{\sin \theta}{r^3 (R - r \cos \theta)} + u \left((\lambda + \mu) \frac{1}{r^2} \frac{R \sin \theta}{(R - r \cos \theta)^2} \right) + \\ + \frac{v(\lambda + 2\mu)}{r^3} \frac{R \cos \theta - r}{(R - r \cos \theta)^2} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

з граничними умовами аналогічними (12). Чисельний розв'язок систем (11) та (17) вимагає значних обчислювальних зусиль, проте, для практичного їх розв'язання можна прийняти допущення, що для тороподібних ділянок при $R \rightarrow \infty$ $v \ll u$; $\frac{\partial v}{\partial \theta}$; $\frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2}$; $\frac{\partial u}{\partial \theta}$; $\frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2}$; $\frac{\partial^2 u}{\partial \theta \partial r}$; $\frac{\partial^2 v}{\partial \theta \partial r} \ll u$; $\frac{\partial u}{\partial r}$; $\frac{\partial^2 u}{\partial r^2}$, що дозволяє зробити висновок про те, що система (17) вироджується в одне рівняння (перший додаток системи (17), перше рівняння)

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{\partial u}{\partial r} \frac{1}{r} - \frac{u}{r^2} = 0, \quad (18)$$

яке є основним рівнянням задачі Ламе [19].

II. Результати

Приймаючи до уваги наведену вище гіпотезу, що при зменшенні товщини стінки трубопроводу в результаті ерозійного чи корозійного зношування конфігурація поперечного перерізу мало відрізняється від кругової розрахунок номінальних кільцевих напружень, які виникають у стінці відводу від дії внутрішнього тиску можна виконати за формулою:

$$\sigma_{\kappa\zeta}^n = \frac{P_{\text{вн}} R_{\text{зовн}}}{\delta(\theta)}, \quad (19)$$

де $\delta(\theta)$ – залежна від полярного кута товщина стінки відводу трубопроводу (рис. 2)

$$\delta(\theta) = R_{\text{зовн}} - R_{\text{вн}}(\theta), \quad (20)$$

де $R_{\text{вн}}(\theta)$ – внутрішній радіус відводу трубопроводу, який зазнає змін у результаті ерозійного чи корозійного зношування стінки (рис. 2).

Якщо відбувається корозія зовнішньої стінки відводу тоді:

$$\delta(\theta) = R_{\text{зовн}}(\theta) - R_{\text{вн}}, \quad (21)$$

де $R_{\text{зовн}}(\theta)$ – зовнішній радіус відводу трубопроводу, який зазнає змін у результаті корозійного зношування.

Формула (19) є інтегральним осередненням більш загальної формули [17]

$$\begin{aligned} \sigma_{\kappa\zeta}^n &= \frac{R_{\text{вн}}^2(\theta) P_{\text{вн}}}{R_{\text{зовн}}^2 - R_{\text{вн}}^2(\theta)} \left(1 + \frac{R_{\text{зовн}}^2}{r^2} \right) - \\ &- \frac{R_{\text{зовн}}^2 P_{\text{зовн}}}{R_{\text{зовн}}^2 - R_{\text{вн}}^2(\theta)} \left(1 + \frac{R_{\text{вн}}^2(\theta)}{r^2} \right), \end{aligned} \quad (22)$$

Оскільки $P_{\text{вн}} \gg P_{\text{зовн}}$ то можна прийняти, що $P_{\text{зовн}} = 0$.

Результати виконаних розрахунків показують, що для відводу трубопроводу зовнішнім діаметром $D = 1420$ мм з номінальною товщиною стінки $\delta_n = 24$ мм при тиску $P = 5$ МПа зменшення товщини стінки на 6 мм у результаті ерозійного чи корозійного зношування призводить до збільшення номінальних кільцевих напружень на 34 %, що не складає загрози для міцності трубопроводу (рис. 3).

III. Обговорення і висновки

У допущенні про пружний характер напружень у матеріалі трубопроводу комплексна оцінка напружень може проводитись за принципом суперпозиції розв'язків задач теорії пружності [18]

$$\tilde{\sigma}_3 = \tilde{\sigma} + \tilde{\sigma}_{\kappa\zeta}, \quad (23)$$

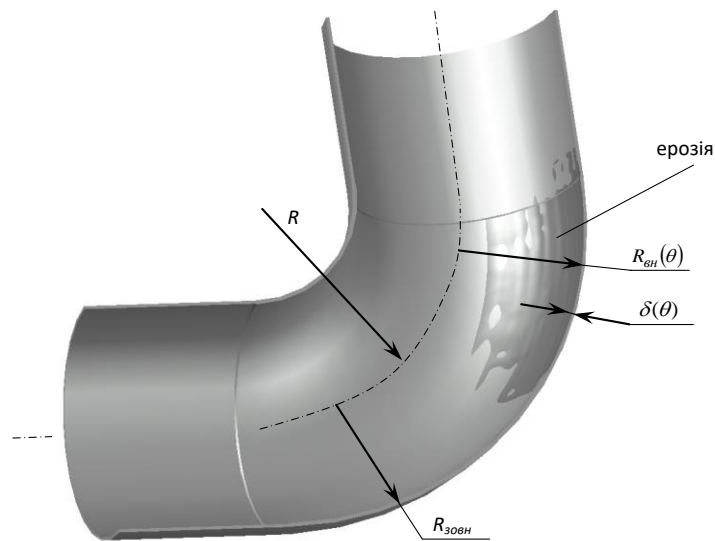


Рис. 2. Розрахункова схема ерозійно зношеного відводу.

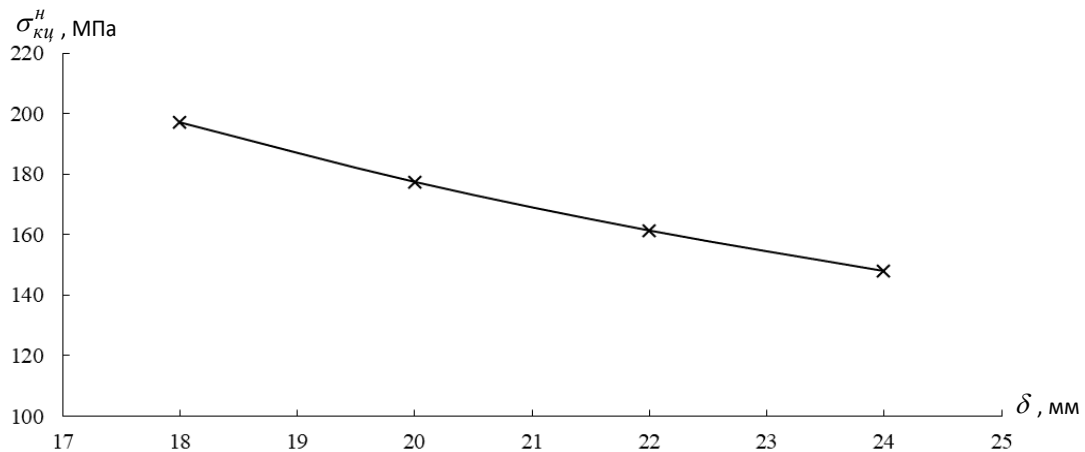


Рис. 3. Зміна номінальних кільцевих напружень у стінці відводу трубопроводу зумовлена його ерозійним чи корозійним зношуванням.

де $\tilde{\sigma}_3$ – загальний тензор напружень; $\tilde{\sigma}$ – тензор напружень, розрахований за алгоритмом (1)-(7); $\tilde{\sigma}_{кц}$ – тензор напружень, розрахований за (21) з урахуванням зміни товщини стінки в результаті ерозійного чи корозійного зношування.

Під час побудови тензора з використанням (1)-(7) необхідно залучати апарат інтерполяції згладжуючими інтерполяційними кубічними сплайнами з метою усунення впливу неточностей, обумовлених похибкою вимірювань переміщень точок верхньої твірної труби інструментальними геодезичними методами [14, 6].

Перевагою формули (19) є її простота порівняно з іншими методами, що дає можливість швидко визначити номінальні кільцеві напруження у стінці ерозійно чи корозійно зношених прямолінійних ділянок трубопроводів, відводів трубопроводів та оцінити їх міцність. Обмежує застосування (19) припущення, що в результаті ерозійного чи корозійного зношування конфігурація поперечного перерізу труби мало відрізняється від кругової, яке

було прийнято щоб розв’язати системи (11) та (17), а тому цю формулу можна застосовувати коли величина ерозійного чи корозійного зношення є не більше половини товщини стінки труби. Плануються подальші дослідження в напрямку оцінки технічного стану відводів трубопроводів зі значними дефектами стінки.

При оцінці номінальних кільцевих напружень за формулами та підходами (19)-(22) з урахуванням ерозійного чи корозійного зношування відводів трубопроводів встановлено, що якщо товщина стінки зменшиться на 6 мм номінальні кільцеві напруження збільшуються на 34 %, що не призведе до втрати міцності трубопроводу.

Отримані результати протестовані шляхом їх порівняння з результатами тривимірного моделювання напруженого стану відводів магістральних газопроводів у програмному комплексі ANSYS Fluent R18.2 Academic з урахуванням складної тривимірної геометричної форми ерозійних дефектів стінки та результатами експериментального вимірювання товщини стінки

відводів магістральних газопроводів і визначення значень напружень методом вимірювання коерцитивної сили. Виявлено практично 90% збіжність одержаних за допомогою цих трьох методик результатів.

Подальші дослідження можуть бути пов'язані з моделюванням напружено-деформованого стану ерозійно-корозійно згושених трійників та перехідників трубопроводів.

Дорошенко Я.В. – доцент, к.т.н., доцент кафедри газонафтопроводів та газонафтосховищ;
Олійник А.П. – професор, д.т.н., завідувач кафедри прикладної математики;
Карпаш О.М. – професор, д.т.н., професор кафедри енергетичного менеджменту та технічної діагностики.

- [1] A.P. Oliynyk, Mathematical models of the process of quasi-stationary deformation of pipeline and industrial systems when changing their spatial configuration (IFNTUNG, Ivano-Frankivsk, 2010).
- [2] A.P. Oliynyk, LM Zamikhovsky, Mathematical apparatus for control of stress-strain state of pipelines (IFNTUNG, Ivano-Frankivsk, 2008).
- [3] M.P. Kovalko, Pipeline gas transport (Agency for Energy Management and Ecology, Kyiv, 2002).
- [4] Yu.E. Yakubovsky, H.A. Malyushin, C.B. Yakubovskaya, OM Platonov, Problems of durability of pipeline transport (Nedra, St. Petersburg, 2003).
- [5] FOR. Yakhno, S.I. Trubachev, Journal of Mechanical Engineering NTUU Kyiv Polytechnic Institute 67, 126 (2003) (<https://doi.org/10.20535/2305-9001.2013.67.37763>).
- [6] G.S. Ratushnyak, Topography with the Basics of Cartography (CNL, Kiev, 2003).
- [7] IV Orylyak, S.A. Radchenko, Problems of Strength 3, 100 (2008).
- [8] F. Guarracino, Problems of Strength 5, 28 (2003).
- [9] A.P. Oliynyk, TO Bolgachenko, Scientific Bulletin of IFNTUNG 1 (19), 153 (2009).
- [10] A.P. Oliynyk, O.Ya. Ivasiv, Quality Control Methods and Devices 16, 8 (2006).
- [11] Ya.V. Doroshenko, Journal of Hydrocarbon Power Engineering 6 (1), 14 (2019) ([https://doi.org/10.31471/2311-1399-2019-1\(11\)-14-21](https://doi.org/10.31471/2311-1399-2019-1(11)-14-21)).
- [12] Ya.V. Doroshenko, Yu.I. Doroshenko, Oil and Gas Exploration and Development 2 (35), 112 (2010).
- [13] T. Vilkys, V. Rudzinskas, O. Prentkovskis, J. Tretjakovas, N. Vishniakov, P. Maruschak, Metals 8 (5), 346 (2018) (<https://doi.org/10.3390/met8050346>).
- [14] Topographic Removal Instruction in Scales 1: 5000, 1: 2000; 1: 1000 and 1: 500: SCNTA-2.04-02-98 (Ukrgeoinform, Kyiv, 1998).
- [15] A.P. Oliynyk, LM Zamikhovsky, VP Ivanyshyn, Intern. scientific-technical Conf. Ivano-Frankivsk: IFNTUNG (Torch, Ivano-Frankivsk, 2000), p. 292
- [16] A.P. Oliynyk, TO Bolgachenko, L.M. Ivanchuk, Scientific News of the Halych Academy 1 (15), 11 (2009).
- [17] B.E. Pobedrya, Lectures on Tensor Analysis (From Moscow Univ., Moscow, 1986).
- [18] B.E. Pobedrya, D.V. Georgievskii, Lectures on the theory of elasticity (URSS Editorial Board, Moscow, 1999).
- [19] LI Sedov, Mechanics of Habitat (Science, Moscow, 1984).

Ya.V. Doroshenko, A.P. Oliynyk, O.M. Karpash

Modeling of stress-Strain State of Piping Systems with Erosion and Corrosion Wear

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine, ya.doroshenko@nung.edu.ua

The problems of modeling the stress-deformed state of erosion or corrosion-worn rectilinear sections and the ball-shaped bends of pipeline systems are proposed to solve in a cylindrical coordinate system. For this purpose, formulas of Christophell type II, non-zero components of the strain tensor and a system of equilibrium equations in the framework of linear torsional theory are given. The system of equilibrium equations is reduced to one equation, which is the basic equation of the Lamé's problem. Formulas for the calculation of ring stresses that occur in the wall of erosion or corrosion worn rectilinear sections, and the removal of pipelines from the action of internal pressure are derived. The influence of the change in the wall thickness of the pipeline bends in the place of their erosion or corrosion wear on the amount of ring stresses is determined.

Keywords: ring stresses, erosion, corrosion, bend, internal pressure, cylindrical coordinate system.