

УДК 539.4

## РОЗРАХУНОК ВМ'ЯТИН МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

Селіверстова І.П.<sup>1</sup>, Дубик Я.Р.<sup>2</sup><sup>1</sup>ІПМіц імені Г.С.Писаренка НАН України м.Київ, Україна<sup>2</sup>ТОВ «ІПП-Центр», м.Київ, Україна

**Анотація.** Розроблено аналітичний розв'язок НДС для оболонки з вм'ятиною на основі методу еквівалентних навантажень. Форма вм'ятини задається в аналітичному вигляді, для якої знайдено точний розв'язок. Як базова, розглядається гармонічна вм'ятини, компоненти переміщень якої легко задаються, а отже можливо знайти сили та моменти. Розв'язок для одиначної вм'ятини знаходиться на основі гармонічного рішення з використанням розкладу у ряди Фур'є. Наведено порівняння аналітичних і чисельних результатів для навантаження у вигляді осьової сили і тиску.

**Ключові слова:** вм'ятини, метод еквівалентних навантажень, кривизна

Магістральні трубопроводи є одним з найпоширеніших засобів, які використовуються при транспортуванні різного роду енергоресурсів. Забезпечення безаварійної експлуатації трубопроводів, безумовно, являється запорукою, як екологічної, так і енергетичної безпеки країни по території якої вони проходять. Найбільш поширеною причиною аварій на магістральних трубопроводах є наявність механічних пошкоджень (вм'ятин та стоншень) та корозія [1]. Тому, ключовим моментом при дослідженні технічного стану та подовженні ресурсу магістральних трубопроводів є визначення їх напруженого стану з врахуванням цих локальних пошкоджень. Вм'ятини є одним з найпоширеніших типів дефектів, що виникають за рахунок зовнішньої взаємодії – пошкодження важкою технікою (екскаватори, трактори, трубокладчики), падіння каміння зверху на трубопровід або ж спирання на каміння. Сучасні нормативні документи регламентують лише допустиму глибину таких дефектів, нехтуючи іншими геометричними параметрами та навантаженням на дефект. На основі методів теорії оболонок та методу еквівалентних навантажень розроблено універсальний підхід до оцінки локального напруженого стану трубопроводу при наявності вм'ятин, що дозволять інженерно оцінювати небезпечність пошкодження.

Метод еквівалентних навантажень є апроксимаційними, але досить точним, запропонований [2] для опису напруженого стану оболонок з дефектами форми. За цим методом НДС оболонки з дефектами форми дорівнює сумі поля напружень ідеальної оболонки під дією початково прикладеного навантаження і поля напружень ідеальної оболонки під дією еквівалентної системи навантажень викликаної дефектами форми.

$$p \approx N_x \chi_{xx} + 2N_{x\varphi} \chi_{x\varphi} + N_{\varphi\varphi} \chi_{\varphi\varphi}, \quad (1)$$

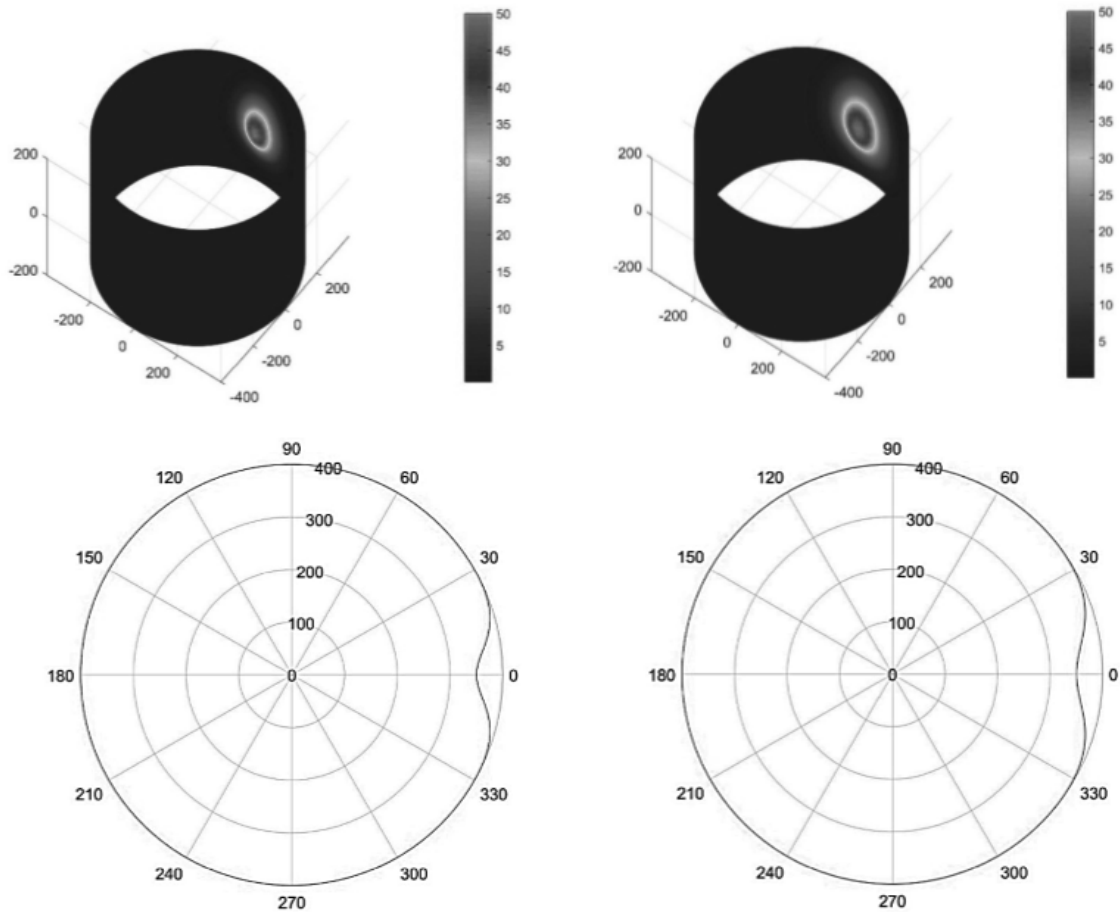
де  $\chi_{xx}$ ,  $\chi_{\varphi\varphi}$  – зміна кривизни в осьовому та коловому напрямках, а  $\chi_{x\varphi}$  – зміни в крученні,  $N_x$ ,  $N_{x\varphi}$ ,  $N_{\varphi\varphi}$  – мембранні зусилля, які виникають із-за дії вихідного навантаження на викривлену оболонку. Рівняння (1) є стандартним при розв'язку задач про неідеальні оболонки і використано багатьма дослідниками [3-6].

Для вирішення задачі необхідно задати форму вм'ятини, звичайно цю форму можна задати на основі реально заміряної геометрії, але для вивчення особливості напруженого стану труби з локальним дефектом доцільно задати форму в аналітичному вигляді. Для аналітичного аналізу краще використовувати гладкі тривимірні дефекти, тому зручно форму вм'ятини записати у вигляді:

$$R(x, \varphi) = R - \xi \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\varphi}{\varphi_0}\right)^2\right) \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{x_0}\right)^2\right), \quad (2)$$

де  $R$  – радіус трубопроводу,  $\xi$  - глибина вм'ятини,  $\varphi_0$  –кутова координата вм'ятини,  $x_0$  – довжина вм'ятини в осьовому напрямі. На Рис. показані дві форми вм'ятини, та їх профілі в окружному напрямі.

Із Рис. 1 помітно, що вм'ятини мають гладкий профіль і легко можуть бути використані для знаходження кривизни оболонок. Рівняння (1) пов'язує еквівалентне навантаження з дефектами форми, кривизни  $\chi_{xx}, \chi_{\varphi\varphi}, \chi_{x\varphi}$  будуть просто частинними похідними другого порядку від функції, яка описує профіль вм'ятини



$$h=10; R=400; \xi=5h; x_0=R\varphi_0=60$$

$$h=10; R=400; \xi=5h; x_0=R\varphi_0=80$$

Рис. 1 – Профілі вм'ятин

Розглянемо періодичну вм'ятину, її профіль може бути описаний гармонічною функцією вигляду:

$$w^* = \xi \cos(n\phi) \cos\left(\frac{m\pi}{l_1} x\right), \quad (3)$$

де параметри  $m = \frac{1}{2}$  та  $n = \frac{R \pi}{l_2 2}$  знаходяться в залежності від розмірів вм'ятини в плані, тобто  $l_1 = x_0$  та  $l_2 = \varphi_0 R$ . Тоді всі інші переміщення оболонки можливо задати у вигляді:

$$u = u_{mn} \cos(n\varphi) \sin\left(\frac{m\pi}{l} x\right), \quad (4)$$

$$v = v_{mn} \sin(n\varphi) \cos\left(\frac{m\pi}{l} x\right), \quad (5)$$

$$w = w_{mn} \cos(n\varphi) \cos\left(\frac{m\pi}{l} x\right), \quad (6)$$

Де  $u_{mn}, v_{mn}, w_{mn}$ . Шукані константи. Оскільки неідеальний профіль може бути виражений розкладом в ряд Фур'є, еквівалентна функція навантаження може бути також виражена у вигляді ряду Фур'є, тобто. задача знаходження НДС оболонки з вм'ятиною може бути вирішена розкладенням в ряди Фур'є. Таким чином, вивчення вм'ятини «гармонійного профілю» являється базовим для наступного аналізу.

Оскільки приймається, що вм'ятини симетрична осьовому та коловому напрямі, беремо в якості початку координат вісь симетрії.

Виразивши силові параметри через переміщення і підставивши їх у силові рівняння, отримаємо систему рівнянь відносно переміщень:

$$u_{mn} \left( \pi m \frac{R}{l} + \frac{1}{2} \frac{(1-\mu)n^2 l}{R \pi m} \right) + v_{mn} \left( \mu n + \frac{1}{2} \frac{(1-\mu)n^2}{\pi m} \right) + w_{mn} \mu = 0 \quad (7)$$

$$u_{mn} \left( \mu n + \frac{1}{2} (1-\mu) \right) + v_{mn} \left( \frac{l}{R} \frac{n^2}{\pi m} + \frac{1}{2} \frac{(1-\mu) \pi m R}{l} + \frac{\delta l}{R^3} \frac{n^2}{\pi m} + \frac{1}{2} \frac{(1-\mu) \pi n}{R l} \right) + w_{mn} \left( \frac{l}{R} \frac{n^2}{\pi m} + \frac{\delta l}{R^3} \frac{n^3}{\pi m} + \frac{1}{2} \frac{\mu \pi m n}{R l} + \frac{(1-\mu) \pi n}{R l} \right) = 0 \quad (8)$$

$$u_{mn} \mu + v_{mn} \left( \frac{\delta}{R l} \mu n \pi m + \frac{1}{2} \frac{(1-\mu) \pi m}{R l} + \frac{\delta l}{R^3} \frac{n^3}{\pi m} + \frac{1}{2} \frac{\delta (1-\mu) \pi n}{R l} + \frac{n}{\pi m} \frac{l}{R} \right) + w_{mn} \left[ \delta \left( \pi^3 m^3 \frac{R}{l^3} + \mu^2 \frac{n^2 \pi m}{R l} \right) + \frac{\delta (1-\mu) \pi m n^2}{R l} \right] = N_{\phi\phi} \xi \frac{n^2 R l}{m \pi} + N_{xx} \xi \frac{n^2 R \pi m}{l} \quad (9)$$

Таким чином задача зводиться до розв'язку алгебраїчної системи рівнянь відносно невідомих  $u_{mn}, v_{mn}, w_{mn}$ . Визначення цих невідомих дозволяє визначити всі силові фактори, напруження і деформації. Варто відмітити, що рішення для гармонійної вм'ятини являється базовим для побудови розв'язку для одичної вм'ятини за допомогою розкладу у подвійні ряди Фур'є. Знайшовши коефіцієнти подвійного ряду і використовуючи розв'язки для гармонійної вм'ятини легко знайти рішення для одичної вм'ятини додаванням.

Нижче на Рис. 2 представлено порівняння аналітичних і чисельних результатів для навантаження у вигляді осової сили на тиску, номінальне напруження дорівнює 1 МПа.

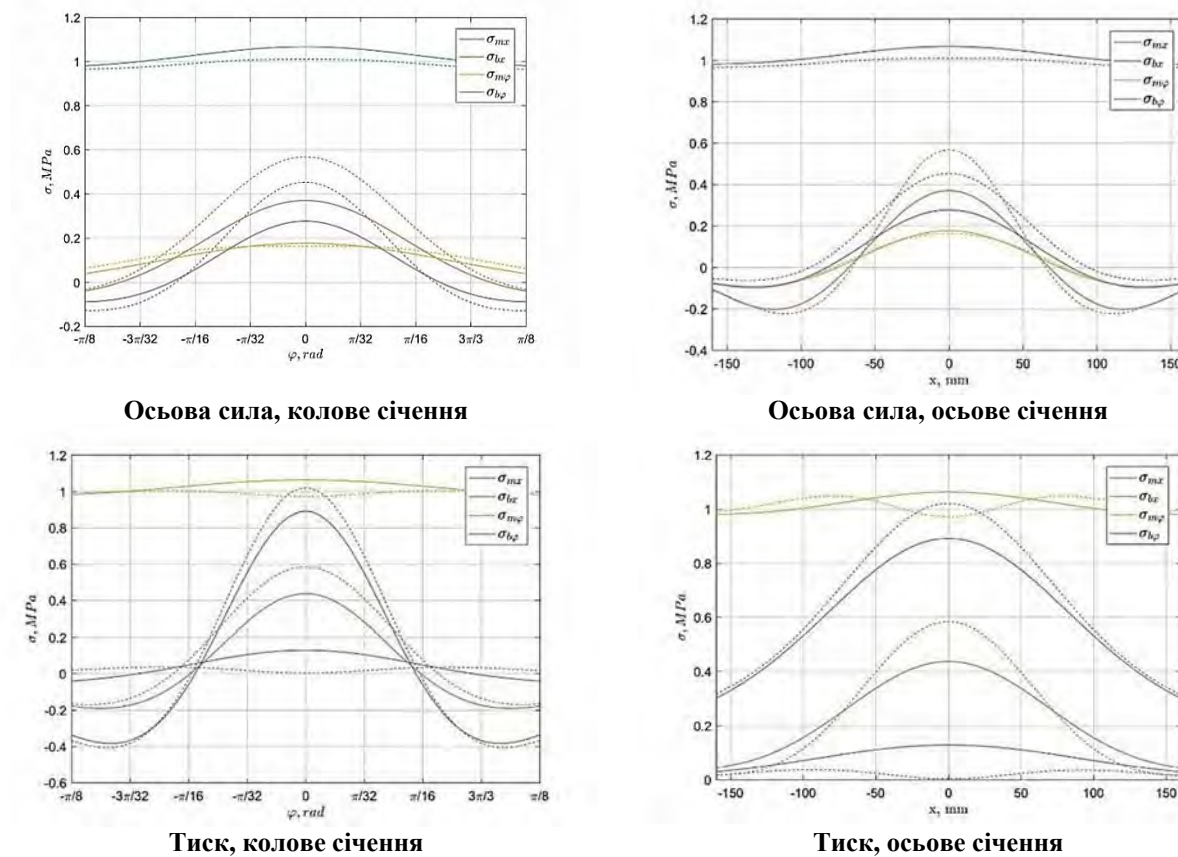


Рис.2.–  $R=400\text{мм}$ ,  $h=10\text{мм}$ ,  $\xi=0.5h$ ,  $l_\varphi=l_x=60$  :

———— численный расчет; ..... аналитическое решение

Отримано аналітичний розв'язок НДС для оболонки з вм'ятиною, на основі методу еквівалентних навантажень. Результати розрахунку перевірені на чисельних моделях, виконаних з використанням сучасних розрахункових комплексів. Показана хороша відповідність чисельних і аналітичних результатів.

#### Список литературы

1. *Gas Pipeline Incidents 9th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group*, 2016
2. Calladine, C.R., 1972, "Structural Consequences of Small Imperfections in Elastic Thin Shells of Revolution," *International Journal of Solids and Structures*, 8, pp. 679–697
3. Godoy, L.A., 1996, *Thin-Walled Structures with Structural Imperfections*, Pergamon, Tarrytown, NY
4. Tam, C.K. and Croll, J.G.A., 1988, "Elastic Stress Concentrations in Cylindrical Shells Containing Local Damage," in *Applied Solid Mechanics*, A.S. Tooth and J. Spence, Eds., Elsevier Applied Science, 2, pp. 155–177.
5. Kato, S. and Yokoo, Y., 1980, "Effects of Geometric Imperfections on Stress Distributions in Cooling Towers," *Engineering Structures*, 2, pp. 150–156
6. Rinehart, A.J. and Keating, P.B., 2002, "Length Effects on Fatigue Behavior of Longitudinal Pipeline Dents," *Proc. of the 2002 International Pipeline Conference*, Calgary, Canada, ASME, pp. 1849–1858