

ТРАНСПОРТ ТА ЗБЕРІГАННЯ НАФТИ І ГАЗУ

УДК 539.375

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ІНТЕНСИВНОСТІ НАПРУЖЕНЬ В ОКОЛІ СИСТЕМИ ПОВЕРХНЕВИХ ТРІЩИН У ТРУБОПРОВОДІ

Ю.В.Банахевич

Управління експлуатації магістральних газопроводів і ГРС ДК „Укртрансгаз”,
01021, Київ

На основі відомого методу граничної інтерполяції побудовано формули для наближеної оцінки коефіцієнтів інтенсивності напружень в околі системи напівеліптичних поверхневих тріщин в стінці труби за її внутрішнього тиску

Ключові слова: коефіцієнт інтенсивності напружень, поверхнева тріщина, трубопровід

На основани известного метода граничной интерполяции получены формулы для приближенной оценки коэффициентов интенсивности напряжений около системы полуэллиптических поверхностных трещин в стенке трубы под действием внутреннего давления

Ключевые слова: коэффициент интенсивности напряжений, поверхностная трещина, трубопровод

On the basis of the known method of ultimate interpolation formulas are built for the approximate estimation of stress intensity factor near the system half elliptic superficial cracks in the wall of pipe under its internal pressure

Keywords: stress intensity factors, superficial crack, pipeline

Трубопровід, система тріщин, коефіцієнт інтенсивності напружень, метод граничної інтерполяції

Вступ. Оцінка залишкового ресурсу нафтогазопроводів (стінка труби вже послаблена дефектами типу тріщин) вимагає визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН) біля системи дефектів типу тріщин в стінці труби за заданих експлуатаційних умов і їх періоду до критичного росту. На даний час уже відомі [1-3] результати таких досліджень, коли стінка труби послаблена однією напівеліптичною тріщиною. Проте відомо, що в багатьох випадках стінка труби послаблена системою поверхневих тріщин, які розміщені близько одна від одної (рис. 1). В даному випадку визначення КІН поблизу контурів таких тріщин пов'язана із значними математичними труднощами.

В даній роботі така задача реалізується наближено з допомогою відомого [3] методу граничної інтерполяції для розв'язку багато параметричних задач теорії тріщин.

Постановка задачі і метод її розв'язання. Розглянемо трубу товщиною h і діаметром D ,

що підлягає дії внутрішнього тиску p_0 . Вважається, що деяка прямокутна область S на поверхні стінки труби заповнена системою m паралельних до твірної і однакових напівеліптичних поверхневих тріщин, велика і мала осі яких e відповідно $2a$ і b (рис. 2, а).

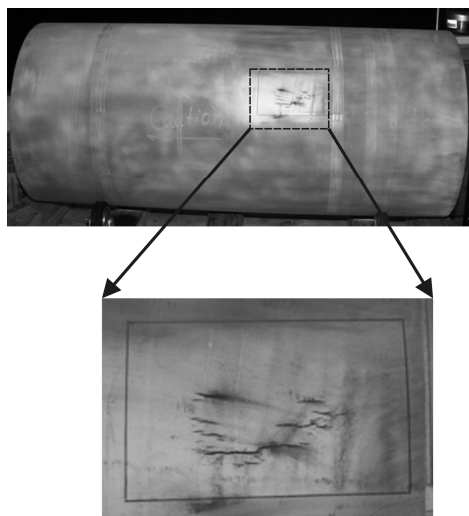


Рисунок 1 – Система поверхневих тріщин на трубі

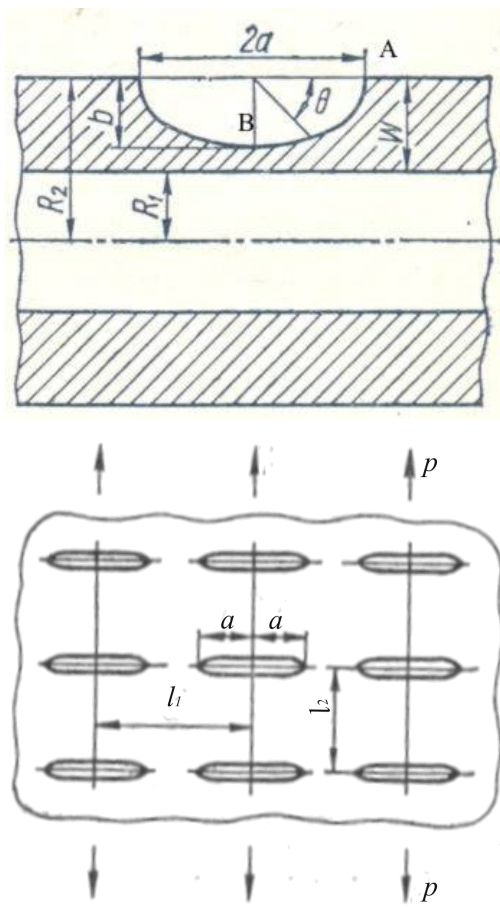


Рисунок 2 – Схеми розміщення поверхневих тріщин у стінці труби

При цьому в кожному ряді вздовж твірної існує n тріщин, а таких паралельних рядів є s ($m = n \cdot s$, рис. 2, б). Як показано на рис. 2, б, відстані між центрами тріщин становлять: вздовж твірної – l_1 і між паралельними – l_2 . Завдання полягає в оцінюванні коефіцієнтів інтенсивності напружень $K_I^{(i)}, K_{II}^{(i)}, K_{III}^{(i)}$ біля контурів тріщин ($i = \overline{1, m}$).

Розв'язок задачі здійснюємо наближено з допомогою відомого [4] методу граничної інтерполяції за таких припущень. Вважаємо, що розмір області S вздовж кола труби є набагато меншим від її діаметра, так що при оцінюванні КІН замість труби можемо розглядати задачу про розтяг пластини рівномірно розподіленими зусиллями $p = 0,5 p_0 D h^{-1}$ з аналогічною областю S , де наявна та ж система паралельних напівеліптичних тріщин.

За результатами роботи [3] величини $K_I^{(i)}, K_{II}^{(i)}, K_{III}^{(i)}$ біля контуру i -ої тріщини можна представити у вигляді

$$\begin{cases} K_I^{(i)} = K_{I\infty}^{(i)} \Omega_i^{(1)}(\lambda_1, \lambda_2, \theta), \\ K_{II}^{(i)} = K_{II\infty}^{(i)} \Omega_i^{(2)}(\lambda_1, \lambda_2, \theta), \\ K_{III}^{(i)} = K_{III\infty}^{(i)} \Omega_i^{(3)}(\lambda_1, \lambda_2, \theta), \end{cases} \quad (1)$$

де: $K_{I\infty}^{(i)}, K_{II\infty}^{(i)}, K_{III\infty}^{(i)}$ – коефіцієнти $K_I^{(i)}, K_{II}^{(i)}, K_{III}^{(i)}$ у випадку необмеженої пластини із однією тріщиною за аналогічного навантаження; $\lambda_1 = 2a l_1^{-1}, \lambda_2 = 2a l_2^{-1}$ – безрозмірні параметри; функції $\Omega_i^{(k)}(\lambda_1, \lambda_2, \theta)$ ($k=1, 2, 3$) вважаються неперервними та неперервно диференційованими.

На основі визначення безрозмірних параметрів λ_j ($j=1, 2$) безрозмірні функції

$$\Omega_i^{(k)}(0, 0, \theta) = 1, \quad (k = \overline{1, 3}). \quad (2)$$

Оскільки безрозмірні параметри $\lambda_j < 1$, то розкладемо функції $\Omega_i^{(k)}(\lambda_1, \lambda_2)$ в ряди в околі точки $(0, 0)$:

$$\begin{aligned} \Omega_i^{(k)}(\lambda_1, \lambda_2, \theta) = & 1 + \sum_{s=1}^{\infty} \sum_{j=1}^2 \alpha_{sjik} \lambda_j^s + \\ & + \sum_{s=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \beta_{iksm} \lambda_1^s \lambda_2^m, \quad (k = \overline{1, 3}; i = \overline{1, m}), \end{aligned} \quad (3)$$

де $\alpha_{sjik}, \beta_{iksm}$ – невідомі коефіцієнти.

Враховуючи рівності (2), а також розклад згаданих функцій за кожним із параметрів λ_j , вираз (3) можемо записати так:

$$\begin{aligned} \Omega_i^{(k)}(\lambda_1, \lambda_2, \theta) = & -1 + \Omega_i^{(k)}(\lambda_1, 0, \theta) + \\ & + \Omega_i^{(k)}(0, \lambda_2, \theta) + \sum_{s=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \beta_{iksm} \lambda_1^s \lambda_2^m, \quad (4) \\ & (k = \overline{1, 3}; i = \overline{1, m}), \end{aligned}$$

Якщо один із параметрів λ_j буде більшим порівняно з іншими, то, нехтуючи в (3) змішаними добутками цих параметрів, функції $\Omega_i^{(k)}(\lambda_1, \lambda_2, \theta)$ визначимо наближено за формулами

$$\begin{aligned} \Omega_i^{(k)}(\lambda_1, \lambda_2, \theta) \approx & -1 + \Omega_i^{(k)}(\lambda_1, 0, \theta) + \\ & + \Omega_i^{(k)}(0, \lambda_2, \theta) \quad (k = \overline{1, 3}; i = \overline{1, m}). \end{aligned} \quad (5)$$

Формули (5) достатньо прості для практичного застосування та дають задовільну точність також для випадку, якщо граничні значення шуканих функцій здебільшого визначаються першими членами їх степеневого розкладу.

Таким чином, на основі співвідношень (1)-(5) коефіцієнти інтенсивності напружень K_I, K_{II}, K_{III} в багатьох конкретних випадках можуть бути наближено визначені через їх граничні значення для відповідних однопараметричних задач. Розглянемо ці граничні випадки, тобто систему напівеліптичних тріщин вздовж однієї прямої і систему паралельних тріщин, для яких знайдемо відповідно невідомі функції

$$\begin{aligned} \Omega_i^{(k)}(\lambda_1, 0, \theta), \quad \Omega_i^{(k)}(0, \lambda_2, \theta) \\ (k = \overline{1, 3}; i = \overline{1, m}). \end{aligned}$$

Система паралельних тріщин. Нехай нескінченна пластина товщиною h послаблена системою s паралельних і однакових напівеліптичних тріщин з півосями a і b , центри яких розміщені на відстані l_2 одна від одної. Така пластина розтягується рівномірно розподіленими зусиллями інтенсивності p (рис. 3). Задача полягає у визначенні коефіцієнтів інтенсивності напружень K_I , K_{II} і K_{III} .

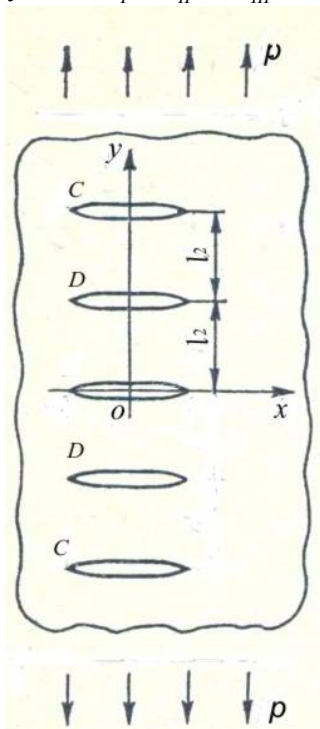


Рисунок 3 – Схема розміщення паралельних тріщин на пластині

На основі (1) КІН для такого випадку можна записати в такому вигляді

$$\begin{cases} K_I^{(i)} = K_{I\infty}^{(i)} \Omega_i^{(1)}(0, \lambda_2, \theta), \\ K_{II}^{(i)} = K_{II\infty}^{(i)} \Omega_i^{(2)}(0, \lambda_2, \theta), \\ K_{III}^{(i)} = K_{III\infty}^{(i)} \Omega_i^{(3)}(0, \lambda_2, \theta), \end{cases} \quad (6)$$

$$(i = \overline{1, s})$$

Через відсутність поздовжнього зсуву поблизу контурів тріщин $K_{III}^{(i)} = 0$, а $K_I^{(i)}$, $K_{II}^{(i)}$ шукаємо наближено так. Із аналізу КІН для систем паралельних тріщин, що наведено в довідниках [5, 6], впливає, що чим більшим буде значення s , тим меншими будуть значення K_I і K_{II} , а максимальні значення КІН спостерігатимуться на крайніх тріщинах (рис. 3 тріщини С), і вони будуть задовольняти таким умовам:

$$K_{I \max}^{(i)} \leq K_{I\infty}^{(i)} [1 - 0,375 \lambda_2^2 + 0,492 \lambda_2^4 + 0(\lambda_2^5)],$$

$$K_{II \max}^{(i)} \leq K_{II\infty}^{(i)} [0,187 \lambda_2^3 + 0(\lambda_2^5)], \quad (7)$$

$$(i = \overline{1, s})$$

При цьому КІН поблизу тріщин типу D всередині системи будуть набагато меншими. При розрахунку залишкової довговічності такої пластини з тріщинами в першу чергу враховується максимальна інтенсивність напружень поблизу найактивніших тріщин.

Система компланарних тріщин вздовж однієї площини. Розглянемо тепер інший граничний випадок, коли вздовж однієї прямої на поверхні розміщена система n напівеліптичних тріщин згаданих вище розмірів. Пластина розтягується в нескінченно віддалених точках рівномірно розподіленими зусиллями інтенсивністю p , які перпендикулярні до лінії розміщення тріщин (рис. 4).

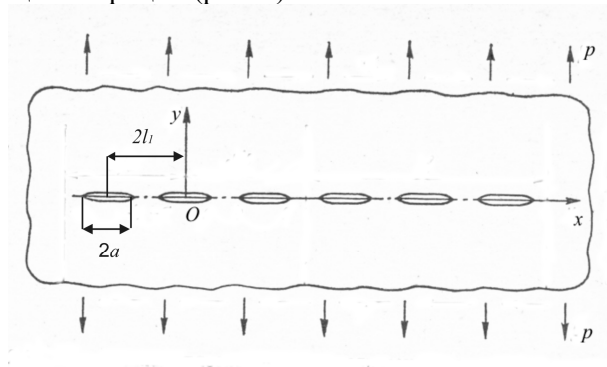


Рисунок 4 – Схема розтягу пластини із системою n напівеліптичних тріщин вздовж однієї прямої

Задача полягає у визначенні коефіцієнтів інтенсивності напружень поблизу контурів тріщин.

Як і в попередньому випадку, запишемо коефіцієнти інтенсивності напружень в такому вигляді

$$\begin{cases} K_I^{(i)} = K_{I\infty}^{(i)} \Omega_i^{(1)}(\lambda_1, 0, \theta), \\ K_{II}^{(i)} = K_{II\infty}^{(i)} \Omega_i^{(2)}(\lambda_1, 0, \theta), \\ K_{III}^{(i)} = K_{III\infty}^{(i)} \Omega_i^{(3)}(\lambda_1, 0, \theta), \end{cases} \quad (8)$$

$$(i = \overline{1, n}).$$

Тут $K_{I\infty}^{(i)}$, $K_{II\infty}^{(i)}$, $K_{III\infty}^{(i)}$ – як і в попередньому випадку, коефіцієнти $K_I^{(i)}$, $K_{II}^{(i)}$, $K_{III}^{(i)}$ для необмеженої пластини із однією тріщиною за аналогічного навантаження.

Оскільки напружено-деформований стан в пластині симетричний відносно площини розміщення тріщин, то величини $K_{II}^{(i)}$ і $K_{III}^{(i)}$ в даному випадку будуть рівні нулю, а $K_I^{(i)}$ визначаємо так. На основі аналізу результатів [5, 6] розв'язків задач для визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень поблизу систем компланарних тріщин розміщених вздовж прямої в одній площині зробити такий висновок. Чим більшим буде значення n , тим більшим буде значення $K_I^{(i)}$. Найбільший коефіцієнт інтенсивності напружень буде біля внутрішніх трі-

щин. Для великих значень λ_1 вираз набуде такого вигляду:

$$K_1^{(i)} \leq K_{\infty}^{(i)} \{1 + 0,637 [0,100\lambda_1^3 + \lambda_1^5 (0,026 + 0,069 \cos^2 \theta - 0,017 \sin^2 \theta)] + O(\lambda_1^6)\} \quad (9)$$

Для крайніх тріщин $K_1^{(i)}$ буде визначатися так

$$K_1^{(i)} \leq K_{\infty}^{(i)} [1 + 3 \cdot 10^{-3} \lambda_1 \times (1 + 0,5 \lambda_1 \cos \theta) + O(\lambda_1^5)]. \quad (10)$$

Оцінка сумарних значень коефіцієнтів інтенсивності напружень поблизу систем тріщин в трубопроводі. На основі викладеного методу граничної інтерполяції і розглянутих граничних випадків виведемо формулу для наближеного визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень поблизу описаної вище системи напівеліптичних тріщин в трубі. Оскільки під час визначення періоду докритичного росту втомної тріщини вважається [3], що втомна тріщина постійно має еліптичну форму і визначається зміна тільки півосей еліпса, то коефіцієнт інтенсивності напружень $K_{\infty}^{(i)}$ для випадку однієї напівеліптичної тріщини в трубі буде визначатися згідно робіт [5, 6] для точок на перетині півосей еліпса з його контуром А ($\theta = 0$) і В ($\theta = 0,5\pi$) так:

$$K_{I\infty A}^{(i)} = p\sqrt{\pi b} \frac{M}{\Phi} S, \quad K_{I\infty B}^{(i)} = p\sqrt{\pi b} \frac{M}{\Phi},$$

$$\Phi = \sqrt{1 + 1,464\lambda^{1,65}},$$

$$M = (1,13 - 0,09\lambda) + \left(\frac{0,89}{0,2 + \lambda} - 0,54\right)\varepsilon^2 + \left(0,5 - \frac{1}{0,65 + \lambda} + 14,0(1 - \lambda)^{2,4}\right)\varepsilon^4,$$

$$S = (1,1 + 0,35\varepsilon^2)\sqrt{\lambda}, \quad \lambda = \frac{b}{a}, \quad \varepsilon = \frac{b}{h}. \quad (11)$$

На основі співвідношень (1)-(11) для наближеної оцінки коефіцієнтів інтенсивності напружень поблизу системи m напівеліптичних тріщин в розглядуваній трубі (рис. 2) отримаємо такі формули:

для внутрішніх тріщин

$$K_{IA \max}^{(i)} \leq p\sqrt{\pi b} [(1,13 - 0,09\lambda) + \left(-0,54 + \frac{0,89}{0,2 + \lambda}\right)\varepsilon^2 + \left(0,5 - \frac{1}{0,65 + \lambda} + 14,0(1 - \lambda)^{2,4}\right)\varepsilon^4] (1,1 + 0,35\varepsilon^2)\sqrt{\lambda} (1 + 1,464\lambda^{1,65})^{-0,5} \{1 + 0,637[0,100\lambda_1^3 + \lambda_1^5 (0,026 + 0,069 \cos^2 \theta - 0,017 \sin^2 \theta)] - 0,375\lambda_2^2 + 0,492\lambda_2^4 + 0(\lambda_1^5, \lambda_2^5)\},$$

$$K_{IB \max}^{(i)} \leq p\sqrt{\pi b} [(1,13 - 0,09\lambda) + \left(-0,54 + \frac{0,89}{0,2 + \lambda}\right)\varepsilon^2 + \left(0,5 - \frac{1}{0,65 + \lambda} + 14,0(1 - \lambda)^{2,4}\right)\varepsilon^4] (1 + 1,464\lambda^{1,65})^{-0,5} \times \{1 + 0,637[0,100\lambda_1^3 + \lambda_1^5 (0,026 + 0,069 \cos^2 \theta - 0,017 \sin^2 \theta)] - 0,375\lambda_2^2 + 0,492\lambda_2^4 + 0(\lambda_1^5, \lambda_2^5)\},$$

$$K_{IIA \max}^{(i)} \leq p\sqrt{\pi b} [(1,13 - 0,09\lambda) + \left(-0,54 + \frac{0,89}{0,2 + \lambda}\right)\varepsilon^2 + \left(0,5 - \frac{1}{0,65 + \lambda} + 14,0(1 - \lambda)^{2,4}\right)\varepsilon^4] \times (1,1 + 0,35\varepsilon^2)\sqrt{\lambda} (1 + 1,464\lambda^{1,65})^{-0,5} \times [0,187\lambda_2^3 + 0(\lambda_2^5)],$$

$$K_{IIB \max}^{(i)} \leq p\sqrt{\pi b} [(1,13 - 0,09\lambda) + \left(-0,54 + \frac{0,89}{0,2 + \lambda}\right)\varepsilon^2 + \left(0,5 - \frac{1}{0,65 + \lambda} + 14,0(1 - \lambda)^{2,4}\right)\varepsilon^4] \times (1,1 + 0,35\varepsilon^2)\sqrt{\lambda} (1 + 1,464\lambda^{1,65})^{-0,5} \times [0,187\lambda_2^3 + 0(\lambda_2^5)], \quad (i = \overline{1, m})$$

для крайніх тріщин

$$K_{IA \max}^{(i)} \leq p\sqrt{\pi b} [(1,13 - 0,09\lambda) + \left(-0,54 + \frac{0,89}{0,2 + \lambda}\right)\varepsilon^2 + \left(0,5 - \frac{1}{0,65 + \lambda} + 14,0(1 - \lambda)^{2,4}\right)\varepsilon^4] \times (1,1 + 0,35\varepsilon^2)\sqrt{\lambda} (1 + 1,464\lambda^{1,65})^{-0,5} \times \{1 + 3 \cdot 10^{-3} \lambda_1 (1 + 0,5\lambda_1 \cos \theta) - 0,375\lambda_2^2 + 0,492\lambda_2^4 + 0(\lambda_1^5, \lambda_2^5)\},$$

$$K_{IB \max}^{(i)} \leq p\sqrt{\pi b} [(1,13 - 0,09\lambda) + \left(-0,54 + \frac{0,89}{0,2 + \lambda}\right)\varepsilon^2 + \left(0,5 - \frac{1}{0,65 + \lambda} + 14,0(1 - \lambda)^{2,4}\right)\varepsilon^4] \times (1,1 + 0,35\varepsilon^2)\sqrt{\lambda} (1 + 1,464\lambda^{1,65})^{-0,5} \times \{1 + 3 \cdot 10^{-3} \lambda_1 (1 + 0,5\lambda_1 \cos \theta) - 0,375\lambda_2^2 + 0,492\lambda_2^4 + 0(\lambda_1^5, \lambda_2^5)\},$$

$$\begin{aligned}
K_{IIA \max}^{(i)} &\leq p\sqrt{\pi b}[(1,13 - 0,09\lambda) + \\
&+ \left(\frac{0,89}{0,2 + \lambda} - 0,54\right)\varepsilon^2 + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{0,65 + \lambda}\right) + \\
&+ 14,0(1 - \lambda)^{2,4})\varepsilon^4](1,1 + 0,35\varepsilon^2)\sqrt{\lambda} \times \\
&\times (1 + 1,464\lambda^{1,65})^{-0,5}[0,187\lambda_2^3 + 0(\lambda_2^5)], \\
K_{IIB \max}^{(i)} &\leq p\sqrt{\pi b}[(1,13 - 0,09\lambda) + \\
&+ \left(\frac{0,89}{0,2 + \lambda} - 0,54\right)\varepsilon^2 + \left(0,5 - \frac{1}{0,65 + \lambda}\right) + \\
&+ 14,0(1 - \lambda)^{2,4})\varepsilon^4](1,1 + 0,35\varepsilon^2) \times \\
&\times \sqrt{\lambda}[0,187\lambda_2^3 + 0(\lambda_2^5)], \quad (i = \overline{1, m})
\end{aligned}
\tag{13}$$

Виведені у такий спосіб формули для наближеного визначення КІН поблизу системи тріщин можна використати для оцінки періоду докритичного росту тріщин в трубі. Тут вибрані тільки максимально можливі значення КІН для будь-яких n, s , що відносно спростило самі формули і зробило їх придатними для практичного застосування. Отримана при цьому неточність піде в запас довговічності труби, що є принципово важливим при розв'язуванні таких задач.

Висновки. Для наближеної оцінки коефіцієнтів інтенсивності напружень поблизу системи напівеліптичних поверхневих тріщин в стінці труби за її внутрішнього тиску виведено достатньо прості формули, які можуть бути використані для визначення залишкового ресурсу труби. Отримані при цьому неточності підуть в запас ресурсу.

1 Delate F. Application of the line spring model to a cylindrical shell containing a circumferential or axial part-through crack / F. Delate, F. Erdogan // Trans. ASME. J. Appl. Mech. – 1982. – 49, № 1. – P. 97-102.

2 Newman J.C. Stress intensity factors for internal surface crack in cylindrical pressure vessels / J.C. Newman, I.S. Raju // Trans. ASME. J. Pressure Vessel Technol. – 1980. – 102, № 4. – P. 342-346.

3 Andreikiv O.Ye., Ivanytskyi Ya.L., Terletska, Z.O., Kit M.B. Assessment of the life of a oil pipe with a surface crack under biaxial block loading / O.Ye. Andreikiv, Ya.L. Ivanytskyi, Z.O. Terletska, M.B. Kit // Materials Science – 2004. – № 3.

4 Андрейкив А.Е. Пространственное задачи теории трещин / А.Е. Андрейкив – К.: Наукова думка, 1982. – 348 с.

5 Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений / Под ред. Мураками. – М.: Мир, 1990 – Т.1,2. – 1016 с.

6 Саврук М.П. Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами / Саврук М.П. – К.: Наукова думка, 1988. – 620 с.

Стаття поступила в редакційну колегію
10.07.09

Рекомендована до друку професором
В. Я. Грудзом