

# АНАЛІЗ НАПІВЕМПІРИЧНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ В ОБ'ЄМНИХ ПОШКОДЖЕННЯХ НА ПОВЕРХНІ ТРУБОПРОВОДУ

П.С. Юхимець<sup>1</sup>, Л.Я. Юрко<sup>1</sup>, С.В. Кобельський<sup>2</sup>, В.І. Кравченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України. 01014, м. Київ, вул. Тимірязєвська, 2. E-mail: ips@ipp.kiev.ua

В роботі проведено порівняльний аналіз деяких рівнянь для розрахунку напружень в зоні корозійних пошкоджень на поверхні трубопроводу. В якості еталонних значень використовувались результати розрахунків напружень МСЕ в зоні об'ємних поверхневих дефектів. Геометричні параметри, необхідні для проведення розрахунків, були представлені у вигляді відповідного набору випадкових незалежних величин, які варіювали в певних межах. Визначено залежності, застосування яких забезпечує помірно консервативні величини і відносно вузький діапазон занижених значень ККН, що є оптимальними при проведенні розрахунків максимальних напружень в дефектах, відповідно, на зовнішній та внутрішній поверхнях. Бібліогр. 19, табл. 3, рис. 5.

*Ключові слова:* концентрація напружень, корозійні дефекти, трубопроводи

Особливостям розрахунку концентрації напружень, зумовленої наявністю об'ємних поверхневих дефектів (ОПД), приділяється достатньо велика увага в науково-технічній літературі. Розподіл напружень поблизу поверхневого поглиблення є достатньо близьким до поля напружень наскрізного отвору і, внаслідок цього, може служити кращому розумінню особливостей напружено-деформованого стану пошкодженого трубопроводу. Тому, перш ніж перейти до аналізу залежностей для розрахунку концентрації напружень в об'ємному поверхневому дефекті, коротко зупинимось на результатах досліджень в цій області, наведених в довідковому виданні [1] та деяких інших роботах, що стосуються отворів.

Задача одноосового розтягу кругового отвору в нескінченній пластині була вирішена Кіршем [2]. В цьому випадку коефіцієнт концентрації напружень (ККН)  $\alpha_\sigma = 3,0$ . В разі циліндричної оболонки, навантаженої внутрішнім тиском [3–5], мінімальне значення концентрації  $\alpha_\sigma = 2,5$ . При значеннях концентрації  $\alpha_\sigma < 10$  максимальні напруження виникають в точках перетину контуру отвору з осьовою площиною симетрії труби. Зі зростанням концентрації напружень ( $\alpha_\sigma > 10$ ) точки максимальних напружень поступово відхиляються від осьового напрямлення. Концентрація напружень зростає разом з безрозмірним коефіцієнтом  $\beta$  (1) – внаслідок збільшення діаметру отвору  $r_0$ , зменшення радіусу серединної поверхні циліндричної оболонки  $R$  та товщини оболонки  $h$ :

$$\beta = \frac{r_0}{\sqrt{Rh}} \frac{(3(1-\mu^2))}{2}, \quad (1)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона матеріалу.

Розглянуті оболонки є одночасно пологими і тонкостінними. Відношення  $r_0/R$  (пологість) та  $h/R$  (тонкостінність) набувають відносно невеликі значення.

Для еліптичного отвору з осями  $a$  і  $b$ , зорієнтованими вздовж твірної та направляючої оболонки, відповідно:

$$r_0 = \frac{a+b}{2}$$

Залежність концентрації напружень на контурі еліптичного отвору в крайніх точках осі  $a$ , розрахована відповідно до [6], розглянута на прикладі труби 1000×12 мм (рис. 1), для трьох співвідношень  $a/d$ : 0,5; 1 та 2, в залежності від довжини осі  $a$ . Як бачимо, напруження по кінцях осі  $a$  в звужених еліптичних отворах вище, ніж в кругових.

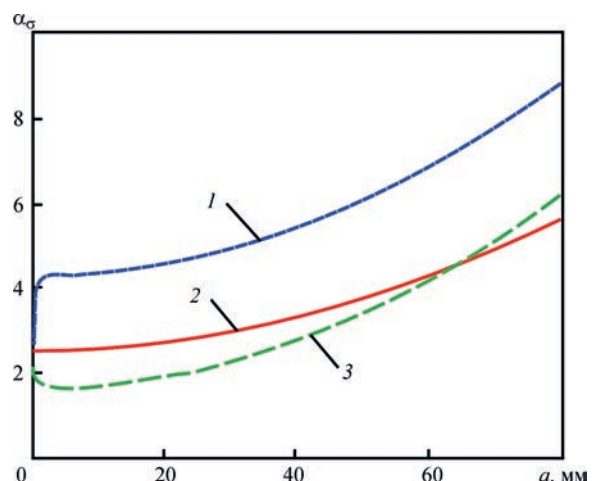


Рис. 1. Концентрація напружень на контурі еліптичного отвору в трубі 1000×12 мм (1, 2 й 3 відповідають співвідношенню  $a/d$ : 2; 1 та 0,5, відповідно)

Юхимець П.С. – <https://orcid.org/0000-0002-8824-9024>, Кравченко В.І. – <https://orcid.org/0000-0003-1641-2336>

© П.С. Юхимець, Л.Я. Юрко, С.В. Кобельський, В.І. Кравченко, 2020

В роботі [7] розглянуто однорідне, нескінченне пружне рівномірно навантажене тіло з порожниною у формі тривісного еліпсоїда, напрямком осей якого збігається з напрямками напружень. Хоча еліпсоїд не відноситься до ОПД, проте є досить їх близьким аналогом і, крім того, одним з нечисленних прикладів точного рішення в даній області. На підставі отриманих результуючих рівнянь встановлено, що розподіл напружень навколо порожнини еліпсоїда залежить від значень головних напружень  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , що прикладені в нескінченності, співвідношення осей еліпсоїда, а не абсолютних значень їх довжини.

Концентрація напружень внаслідок наявності мілких сферичних поглиблень на обох сторонах 1-осьово розтягнутої пластини з діаметром в 4...5 разів більшим, ніж товщина пластини, виявляється незначною – нижчою, ніж у випадку наскрізного отвору [3]. Отримані результати поширюються й на рівномірний 2-осьовий розтяг. За таких великих радіусів поглиблення зростання напружень відбувається, головним чином, за рахунок потоншення зразка, а не концентрації напружень. Мілкі сферичні поглиблення часто використовуються як засіб для усунення невеликих дефектів на поверхні конструкції.

В роботі [8] було визначено коефіцієнт  $\alpha_\sigma = 2,23$  для випадку рівномірного розтягу напівнескінченного тіла з напівсферичним поглибленням. Під час рівномірного 2-осьового розтягу пластини з гіперболічним поглибленням величина коефіцієнту  $\alpha_\sigma$ , в залежності від розмірів поглиблення, змінювалась в межах 3,4...3,8 [10], що перевищує значення напружень для кругового отвору.

В роботі [10] представлено аналіз та узагальнення розрахункових та експериментальних досліджень локального НДС і міцності пластин та оболонки з ненаскрізними ушкодженнями, що мають різну геометрію, до яких відносяться подряпини, корозійні плями, поверхневі тріщини. Як наголошується, аналітичне розв'язання задачі оцінки параметрів НДС в зоні ненаскрізного отвору є вельми складним, існуючі рішення отримані для нескінченної пластини з напівсферичним потоншенням. В практиці інженерних розрахунків набули поширення, поряд з розрахунками МСЕ, напівемпіричні залежності, деякі з яких стосуються ОПД на поверхні трубопроводу під внутрішнім тиском. У зв'язку з можливими розбіжностями результатів при розрахунку ККН, у цій роботі було поставлено завдання порівняльного аналізу зазначених рівнянь з метою подальшого обґрунтованого використання, в тому числі, при розрахунку циклічної міцності пошкоджених трубопроводів.

Згідно роботи [11] рівень навантаження можна охарактеризувати коефіцієнтами концентрації

кільцевих  $\alpha_0$  і поздовжніх  $\alpha_z$  напружень, що виникають в дефектній зоні труби з зовнішнім діаметром  $D_o$  і товщиною стінки  $h$ , що представляється виїмкою глибиною  $b$ , довжиною  $2c$  уздовж осі труби і кутовим розміром  $\Theta$  в кільцевому напрямку (ширина дефекту  $2d$  дорівнює  $\Theta D_o/2$ ), під дією кільцевих  $\sigma_{\thetaном}$  і поздовжніх  $\sigma_{zном}$  номінальних напружень:

$$\alpha_0 = \frac{1 + \eta \alpha_0}{2\eta} + \frac{1 - \eta \alpha_0}{2\eta} th \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} (\hat{L} + \eta \pi - \pi) \right], \quad (2)$$

$$\text{де } \alpha_z = \frac{\pi \eta + 2(1 - \eta) \sin \gamma}{\eta [\pi - \gamma(1 - \eta)]} + \frac{(\alpha_0 - 1)(\pi - \gamma)}{\pi},$$

$$\eta = \frac{h - b}{h}, \quad \alpha_0 = 3 - 2^{\frac{3\eta - 1}{2\eta}}, \quad \hat{L} = \frac{L}{\sqrt{R(h - b)}}, \quad \gamma = \frac{\Theta}{2}.$$

Залежності (2) отримані на основі результатів скінчено-елементного аналізу в широкому діапазоні відношень розмірів труб та дефектів ( $h/R = 0,015...0,030$ ;  $2c/R = 0,01...3,0$ ;  $\Theta = 1...360^\circ$ ;  $b/h = 10...90\%$ ) окремо для кільцевих і поздовжніх напружень.

У статті [12] вираз для коефіцієнта концентрації напружень в одиночних виразах трубопроводів теплових мереж має вигляд:

$$\alpha_\sigma = 1 + 3,57 \frac{b}{2d} \left[ \frac{1,12 - 0,9b/2c}{1 - b/h(1 - 1,5b/2c)} \right] \quad (3)$$

Згідно роботи [12] максимальне напруження в дефекті:

$$\sigma_{max} = \alpha_\sigma \sigma_{nt}, \quad (4)$$

де  $\sigma_{nt}$  – напруження в перерізі, де знаходиться виразка:

$$\sigma_{nt} = \sigma_r h / (h - b),$$

де  $\sigma_r$  – номінальне напруження.

Розроблена в ІЕЗ інженерна методика оцінки залишкового ресурсу елементів трубопроводу з об'ємними поверхневими дефектами [13] в якості одного з кроків з визначення локального напружено-деформованого стану включає розрахунок ККН в зоні дефекту за запропонованою в [14] залежністю (5), в основу якої покладено вираз для визначення коефіцієнта інтенсивності напружень в напівеліптичній тріщині з тією ж довжиною та глибиною, що має напівеліпсоїд, що описує пошкодження:

$$\alpha_\sigma = 1,4 \left\{ 1 + \frac{2 \frac{b}{d} [1,12 - 0,48 \frac{b}{c} + 0,13 \frac{b}{c} (3 \frac{b}{c} - 2 - \frac{b}{h})]}{1 - \frac{b}{h} (1 - 0,75 \frac{b}{c})} \sqrt{1 + \frac{5\pi \lambda^2}{32}} \right\} \quad (5)$$

де  $\lambda$  – функція, що враховує кривизну поверхні:

$$\lambda^2 = \frac{c^2}{Rh} [12(1 - \mu^2)]^{1/2}$$

Коригуючий коефіцієнт 1,4 був введений у вираз (5) після експериментальної перевірки, виконаної в ІЕЗ на натурному зразку труби 322×7 (Ст 20) [15]. Зіставлення експериментальних даних з результатами розрахунку МСЕ виявило досить близьку відповідність (відносна похибка в межах 15 %), що дозволило надалі в рамках даного дослідження прийняти результати розрахунків НДС в зоні об’ємних дефектів на поверхні трубопроводу під впливом внутрішнього тиску, за використання пакету програм [16], в якості еталонних значень. Розрахунки напружено-деформованого стану виконувались в пружній постановці на основі змішаних апроксимацій методу скінченних елементів з використанням просторових 8-ми вузлових елементів, побудованих на основі шестигранної призми з вузлами в її вершинах і центрі [17]. Переваги змішаних формулювань МСЕ полягають у зменшенні похибки апроксимації за напруженнями та деформаціями у порівнянні з такими для класичного МСЕ в формі методу переміщень, а також в можливості точного задоволення статичних граничних умов на поверхні тіла. Ще одна перевага полягає в тому, що змішана схема МСЕ дає безперервні апроксимації напружень і деформацій. В якості об’єкту розрахунку розглядалась прямолінійна ізотропна циліндрична оболонка (модуль пружності  $E = 210000$  МПа, коефіцієнт Пуасона  $\nu = 0,3$ ) під дією внутрішнього тиску 1 МПа, один торець якої жорстко закріплений, інший вільний для поздовжніх переміщень. Дефект трубопроводу моделювався половиною еліпсоїду, осями симетрії якого є найбільші розміри дефекту в осьовому, кільцевому і радіальному напрямках, що співпадають з напрямками осей оболонки.

Поставлена в роботі задача вирішувалась в наступній послідовності:

- формування масиву розрахункових варіантів і еталонних значень ККН;
- множинний регресійний аналіз еталонних значень;
- обрахунок масиву варіантів з використанням напівемпіричних залежностей та статистичний аналіз результатів.

**Таблиця 1. Результати розрахунку ККН**

$N$ п/п	$D_0$ , мм	$h$ , мм	$b$ , мм	$c$ , мм	$b$ , мм	$\sigma_{i \max}^3$ , МПа	$\sigma_{i \max}^B$ , МПа	$\sigma_m$ , МПа	$\alpha_\sigma^3$	$\alpha_\sigma^B$
31	245	24	8	30	24	7,64	7,93	4,0	1,9	2,0
32	245	28	12	33	38	7,27	6,52	3,4	2,2	1,9
33	245	15	7	12	8	15,77	19,00	6,7	2,4	2,8
34	245	10	6	50	42	45,86	21,00	10,2	4,5	2,1
35	245	9	2	35	27	19,81	15,99	11,4	1,7	1,4
36	245	25	10	24	33	7,46	8,44	3,8	1,9	2,2
37	245	28	8	5	12	5,08	6,85	3,4	1,5	2,0
38	245	21	11	15	46	10,19	10,83	4,6	2,2	2,3

Як свідчить досвід діагностування, форма об’ємних поверхневих дефектів відрізняється великим розмаїттям, а розміри – широтою діапазону. Таким чином, геометричні параметри трубопроводу (діаметр і товщина стінки), а також дефекту (довжина, ширина і глибина), що використовуються для визначення НДС в зоні пошкодження, можна представити у вигляді відповідного набору випадкових незалежних величин, які можуть варіюватися в певних межах.

Показність (відповідність властивостям генеральної сукупності) сформованої вибірки забезпечувалась за допомогою випадкового відбору (з використанням генератора випадкових чисел) всіх вихідних геометричних параметрів, необхідних для проведення розрахунку. Вибір діаметрів в діапазоні 57...600 та 630...820 мм проводився на базі сортаменту згідно з [18] й [19] відповідно. Діапазон товщини встановлювався в межах згідно з відповідним стандартом для даного діаметра труби.

Діапазони зміни розмірів дефекту відповідали обмеженням, встановленим для геометричної моделі розрахункової програми:

- діапазон глибини  $b = (0,2...0,8) h_{ran}$ ,
- де  $h_{ran}$  – товщина труби у відповідному варіанті;
- напівдовжина дефекту  $c = (D_0 - b)/2 \times (0,03...0,46)$ ;
- напівширина дефекту  $d = (D_0 - b)/2 \times (0,03...0,46)$ .

Кожен з варіантів вибірки обраховувався двічі – при розташуванні дефекту на зовнішній і внутрішній поверхні. Число варіантів вибірки – 80, встановлювалося з урахуванням того, що достатнє для проведення статистичного аналізу число спостережень повинне перевищувати число незалежних змінних в 10...20 разів.

В якості прикладу в табл. 1 наведені вихідні дані (сформована вибірка) і відповідні результати розрахунку МСЕ для пошкоджень труби  $D_n 245$ .

В табл. 1 додатково використані наступні позначення:

- $\sigma_{i \max}^3, \sigma_{i \max}^B$  – максимальна інтенсивність напружень в дефекті при його розташуванні на зовнішній та внутрішній поверхні, відповідно;
- $\alpha_\sigma^3, \alpha_\sigma^B$  – ККН в дефекті при його розташуванні на зовнішній та внутрішній поверхні, відповідно;

$\sigma_{in}$  – інтенсивність номінальних напружень.

Вибіркові характеристики результатів розрахунку ККН методом скінчених елементів в дефектах на внутрішній та зовнішній поверхнях є близькими за значеннями (табл. 2).

При цьому відношення індивідуальних значень концентрації напружень при рівності геометричних параметрів дефекту і труби знаходяться в діапазоні 0,3...3,6 (рис. 2), коефіцієнт кореляції ККН на внутрішній і зовнішній поверхнях становить 0,47.

Множинний регресійний аналіз виконувався окремо для результатів розрахунку ККН в дефектах на внутрішній і зовнішній поверхні. Аналіз був виконаний для визначення залежності ККН від геометричних параметрів пошкодженої труби і розмірів дефекту та отримання відповідних регресійних рівнянь.

Попередньо було досліджено відповідність результатів розрахунків нормальному розподілу як для вихідних значень концентрації  $\alpha_{\sigma}$ , так і перетворених значень  $\ln(\alpha_{\sigma})$  та  $1/\alpha_{\sigma}$ . Найбільш близьку відповідність нормальному закону розподілу, що перевірялась за допомогою критерія хі-квадрат, продемонструвало перетворення  $1/\alpha_{\sigma}$ , для якого нульова гіпотеза може бути прийнята, у випадку

Змінна	$M$ – середнє значення	$S$ – стандартне відхилення
$\alpha_{\sigma}^3$	2,46	1,09
$\alpha_{\sigma}^B$	2,46	1,06

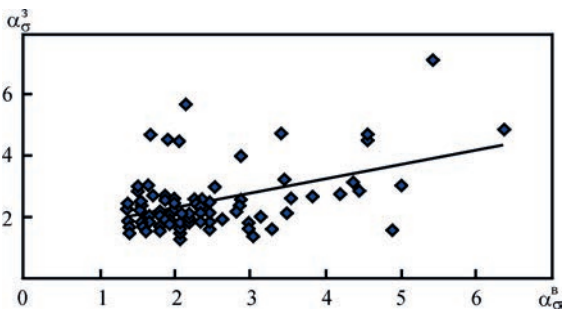


Рис. 2. ККН дефектів з однаковими геометричними параметрами в залежності від поверхні розташування

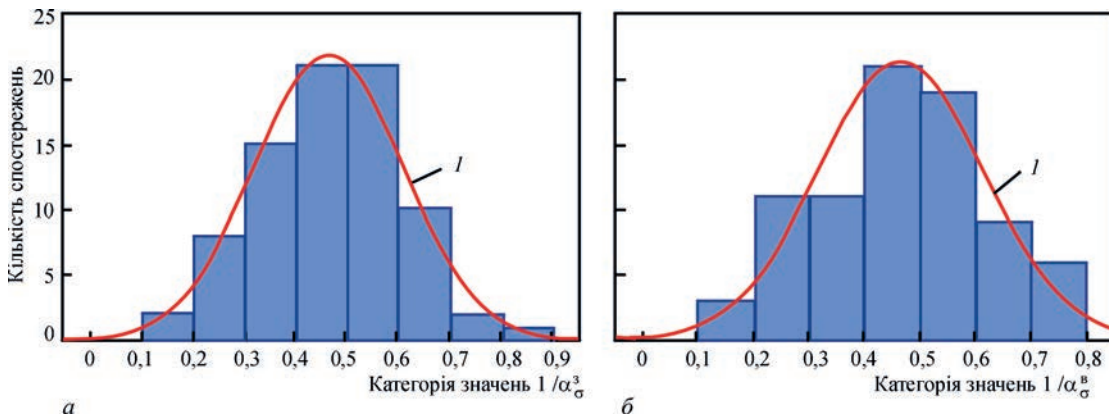


Рис. 3. Гістограми розподілу значень ККН в дефектах на поверхні: а – зовнішній; б – внутрішній. Цифрою 1 позначена крива відповідного нормального розподілу

ках зовнішньої та внутрішньої поверхні, при рівні значущості  $\rho = 0,73$  та  $\rho = 0,29$ , відповідно (рис. 3).

Розрахункові значення коефіцієнту множинної кореляції, що відображає щільність зв'язку між залежною змінною  $1/\alpha_{\sigma}$  та сукупністю незалежних змінних (діаметром та товщиною труби, глибиною, довжиною та шириною дефекту), становлять для зовнішньої та внутрішньої поверхні  $K_R = 0,79$  та  $K_R = 0,74$  відповідно.

Аналіз взаємозв'язку між величиною  $\alpha_{\sigma}^B$  або  $\alpha_{\sigma}^3$  і глибиною дефекту при фіксованих значеннях інших незалежних змінних (парціальна кореляція) свідчить про наявність позитивної кореляції. Індивідуальний вплив інших параметрів (діаметра і товщини стінки труби, довжини і ширини дефекту) є протилежним, залежно від того, чи є дефект внутрішнім або зовнішнім (рис. 4).

Регресійні рівняння залежності ККН в поверхневих об'ємних дефектах на зовнішній (6) і внутрішній (7) поверхні від геометричних параметрів пошкодження трубопроводу отримані з використанням процедури так званого багатокрокового регресійного аналізу. Цей метод заснований на обчисленні декількох проміжних рівнянь регресії, в результаті аналізу яких отримують кінцеву модель, що включає тільки фактори, що мають статистично істотний вплив на досліджувану залежну змінну.

$$1/\alpha_{\sigma} = 0,515 + 0,018h - 0,039b - 0,004c \quad (6)$$

$$1/\alpha_{\sigma} = 0,475 - 0,025b + 0,004d \quad (7)$$

Оцінка придатності вищевказаних напівемпіричних залежностей для обчислення ККН виконувалася на підставі зіставлення:

- діапазонів розкиду відносних значень ККН, що визначались як частка від ділення результату, отриманого за залежністю, на відповідне еталонне значення;
- ймовірності отримання результату обрахунку ККН за залежністю, що буде менше, ніж відповідне еталонне значення (занижений результат).

Слід відзначити, що:

- залежності (2) були виключені з аналізу, оскільки сформовані вибірки еталонних значень



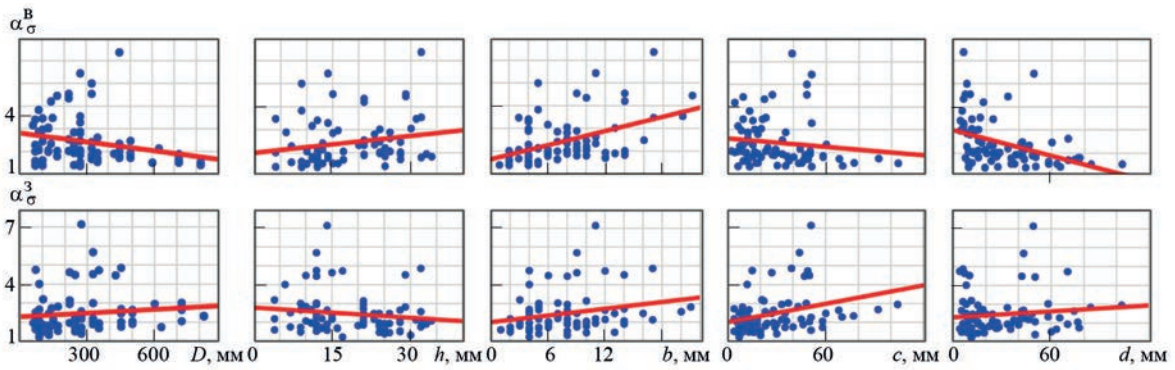


Рис. 4. Залежність ККН від геометричних параметрів та поверхні розташування

Таблиця 3. Ймовірнісні характеристики розрахункових залежностей

Залежність	Дефект внутрішньої поверхні		Дефект зовнішньої поверхні		
	95 % довірчий інтервал $\alpha_{\sigma} / \alpha_{\sigma}^{мсе}$	Ймовірність $\alpha_{\sigma} / \alpha_{\sigma}^{мсе} < 1$	Залежність	95 % довірчий інтервал $\alpha_{\sigma} / \alpha_{\sigma}^{мсе}$	Ймовірність $\alpha_{\sigma} / \alpha_{\sigma}^{мсе} < 1$
(5)	0,69...2,01	12,1 %	(5)	0,67...5,8	28 %
(3)	0,88...20	4,1 %	(3)	0,97...4,35	0,9 %
(7)	0,68...3,57	3,2 %	(6)	0,47...1,79	32,4 %

містили недостатньо результатів, що задовольняли встановлену в [11] вимогу по відношенню до геометричних параметрів труб ( $h/R = 0,015...0,030$ );

– з урахуванням сортаменту найбільш поширених в теплових мережах труб, при аналізі залежності (3) було встановлено обмеження  $h/R < 0,2$ , що зменшило обсяг варіантів еталонних вибірок з 80 до 60.

Ширина діапазону розкиду відносних значень, який використовувався для порівняння залежностей, обмежувалась 95 % довірчим інтервалом  $M \pm 2S$ , що визначався на основі вибіркових характеристик. Відповідно, ймовірність отримання заниженого результату розраховувалась в межах 95 % довірчого інтервалу (рис. 5).

Розглянемо результати розрахунків, що наведені в табл. 3. Відмітимо, що на відміну від регресій-

них рівнянь, залежності (3) та (5) використовувалися як для розрахунків дефектів зовнішньої, так і внутрішньої поверхні. При розрахунках дефектів внутрішньої поверхні найменшу ймовірність отримання неконсервативного результату дає використання залежності (3). При цьому одночасно існує велика ймовірність обчислення значно завищених (до 20 разів) значень ККН, що мабуть не є виправданим навіть при визначенні втомної міцності. Залежність (5) забезпечує помірно консервативні значення ККН і відносно вузький діапазон занижених (в 1...1,5 рази) значень, що в більшості випадків будуть компенсовані використанням стандартних коефіцієнтів запасу міцності. Очевидно, що при розрахунку дефекту на зовнішній поверхні найбільш універсальною є залежність (3), оскільки забезпечує прийнятно консервативні ( $\alpha_{\sigma} / \alpha_{\sigma}^{мсе} < 4,35$ ) і практично виключає занижені величини ККН.

**Висновки**

Виконано аналіз деяких рівнянь для розрахунку концентрації напружень в зоні корозійних пошкоджень на основі співставлення результатів розрахунку за їх використанням з даними розрахунків МСЕ, прийнятими в якості еталонних.

Встановлено, що при розрахунку концентрації напружень при використанні зазначених рівнянь, існує ймовірність (в залежності від поєднання геометричних параметрів дефекту й труби) отримання як значно завищених, так і занижених (неконсервативних) значень.

Визначено залежності, застосування яких забезпечує помірно консервативні величини і відносно вузький діапазон занижених значень ККН, що є придатними для проведення розрахунків максимальних напружень в дефектах, відповідно, на зовнішній та внутрішній поверхнях.

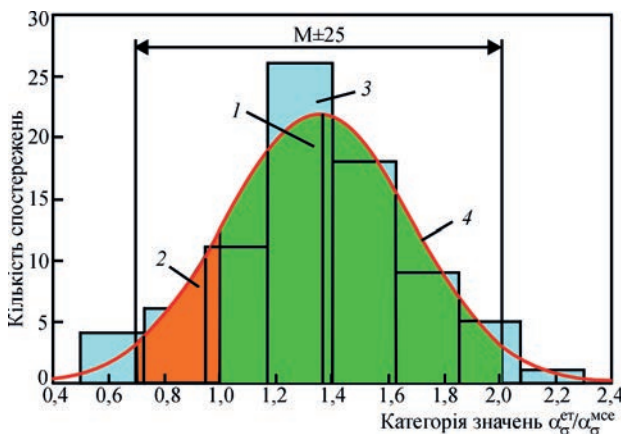


Рис. 5. Діапазон розкиду відносних значень  $\alpha_{\sigma}^{ст} / \alpha_{\sigma}^{мсе}$  ( $\alpha_{\sigma}^{ст}$  – ККН, обчислений за (5);  $\alpha_{\sigma}^{мсе}$  – еталонне значення ККН в дефекті на внутрішній поверхні): 1 – середнє вибіркове значення M; 2 – область занижених значень ККН в межах 95 % довірчого інтервалу; 3 – гістограма розподілу значень  $\alpha_{\sigma}^{ст} / \alpha_{\sigma}^{мсе}$ ; 4 – графік нормальної густини ймовірності, що відповідає вибірковим характеристикам значень  $\alpha_{\sigma}^{ст} / \alpha_{\sigma}^{мсе}$

Список літератури

1. Петерсон Р. (1977) Коэффициенты концентрации напряжений. Москва, Издание Мир.
2. Kirsch B. Z. *VDI*. July 16., Vol. 42, (1898), pp. 797–807
3. Lekkerkerker J.C. (1964) Stress concentration around circular holes in cylindrical shells. Proc. 11th Internat. Congr. Appl. Mech., Springer, Berlin, 283.
4. Erigden A.C., Naghdi A.K., Thiel C.C. (1965) State of stress in a circular cylindrical shell with a circular hole. *Welding research council bulletin*, 102.
5. Van Dyke P. (1965) Stress about a circular hole in a cylindrical shell. *AIAA J.*, 3, p. 1733.
6. Савин Г.Н. (1968) Распределение напряжений около отверстий. Киев, Наукова думка.
7. Sadovsky M.A., Sternberg E. (1949) Stress concentrations around triaxial ellipsoidal cavity. *Journal of applied mechanics*, June, 149–157.
8. Eubanks R.A. (1954) Stress concentration due to a hemispherical pit at free surface. Trans. ASME, 76, *Applied Mechanics section*, p. 57.
9. Reed R.E., Wilcox P.R. (1970) *Stress concentration due to a hyperboloid cavity in a thin plate*. NASA TN D-5955, Washington, D.C.
10. Мясников Н.П., Родионов Г.Л., Сидоренко А.С. (2001) Прочность тонкостенных конструкций при наличии локальных повреждений. *Электронный журнал «Труды МАИ»*, 3.
11. ВРД 39-1.10-004-99 *Методические рекомендации по количественной оценке состояния магистральных газопроводов с коррозионными дефектами, их ранжирования по степени опасности и определению остаточного ресурса*.
12. Гевлич С.О. (2010) *Об оценке механизма перехода в предельное состояние в водяных трубах*. <http://www.vestipb.ru/articles3617.html>.
13. Юхимец П.С., Гарф Э.Ф., Нехотящий В.А. (2005) Экспериментальное обоснование метода расчета остаточного ресурса трубопроводов с коррозионными повреждениями. *Автоматическая сварка*, 11, 17–21.
14. Фокин М.Ф., Трубицын В.А., Никитина Е.А. (1986) *Оценка эксплуатационной долговечности магистральных трубопроводов в зоне дефектов*. Москва, ВНИИОЭНГ.
15. Гарф Э.Ф., Нетребский М.А., Юхимец П.С., Кобельский С.В. (2000) Концентрация напряжений на участках коррозионных повреждений трубопроводов. *Автоматическая сварка*, 6, 3–6.
16. (2004) *Програма забезпечення «Тривимірне скінченно елементне моделювання теплового і тепло напруженого стану елементів машинобудівних конструкцій (SPACE)»*. Система сертифікації УкрСЕПРО. Сертифікат відповідності № UA1.017.0054634-04.
17. Кобельский С.В. (2010) Построение смешанных конечных элементов на основе шестигранной призмы для решения пространственных задач теории упругости. *Надежность и долговечность машин и сооружений*, 33, 248–262.
18. ГОСТ 8732-78 *Трубы стальные бесшовные горячедеформированные*. Сортамент.
19. ГОСТ 10704-91 *Трубы стальные электросварные прямошовные*. Сортамент.

References

1. Peterson, R. (1977) *Stress concentration factors*. Moscow, Mir [in Russian].
2. Kirsch B. Z. *VDI*. July 16., Vol. 42, (1898), pp. 797–807
3. Lekkerkerker, J.C. (1964) Stress concentration around circular holes in cylindrical shells. In: Proc. of 11th Intern. Congr. Appl. Mech., Springer, Berlin, 283.
4. Erigden, A.C., Naghdi, A.K., Thiel, C.C. (1965) State of stress in a circular cylindrical shell with a circular hole. *Welding Research Council Bulletin*, 102.
5. Van Dyke, P. (1965) Stress around a circular hole in a cylindrical shell. *AIAA J.*, 3, 1733.
6. Savin, G.N. (1968) *Stress concentration around holes*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
7. Sadovsky, M.A., Sternberg, E. (1949) Stress concentrations around triaxial ellipsoidal cavity. *J. of Applied Mechanics*, June, 149–157.
8. Eubanks, R.A. (1954) Stress concentration due to a hemispherical pit at free surface. Trans. ASME, 76, *Applied Mechanics section*, 57.
9. Reed, R.E., Wilcox, P.R. (1970) *Stress concentration due to a hyperboloid cavity in a thin plate*. NASA TN D-5955, Washington, D.C.
10. Myasnikov, N.P., Rodionov, G.L., Sidorenko, A.S. (2001) Strength of thin-walled structures in the presence of local damages. *Electron J., Trudy MAI*, 3 [in Russian].
11. VFD 39-1.10-004-99: *Methodological recommendations for quantitative evaluation of the state of the main gas pipelines with corrosion defects, their ranking by the degree of criticality and determination of residual life* [in Russian].
12. Gevlich, S.O. (2010) *On evaluation of the mechanism of transition to limit state in water pipes*. <http://www.vestipb.ru/articles3617.html> [in Russian].
13. Yukhimets, P.S., Garf, E.F., Nekhotyashchy, V.A. (2005) Experimental substantiation of method for calculation of residual life of pipelines with corrosion damages. *The Paton Welding J.*, 11, 11-15.
14. Fokin, M.F., Trubitsyn, V.A., Nikitina, E.A. (1986) *Evaluation of service life of the main pipelines in the defect zone*. Moscow, VNIIOENG [in Russian].
15. Garf, E.F., Netrebsky, M.A., Yukhimets, P.S., Kobelsky, S.V. (2000) Stress concentration in the areas of corrosion damage of pipelines. *The Paton Welding J.*, 6, 2-5.
16. (2004) Software: 3D finite element modeling of thermal and thermal-stressed state of elements of mechanical engineering structures (SPACE). Certification system SEPRO. Certificate of conformity UA1.017.0054634-04 [in Ukrainian].
17. Kobelsky, S.V. (2010) Construction of mixed finite elements on the base of hexagonal prism for solution of 3D problems of elasticity theory. *Nadyozhnost i Dolgovechnost Mashin i Sooruzhenij*, 33, 248–262 [in Russian].
18. GOST 8732-78: *Seamless hot-deformed steel pipes. Range of sizes* [in Russian].
19. GOST 10704-91: *Electrically welded steel line-weld tubes. Range of sizes* [in Russian].

ANALYSIS OF SEMI-EMPIRICAL EQUATIONS FOR DETERMINATION OF STRESS CONCENTRATION IN VOLUMETRIC DAMAGES ON PIPELINE SURFACE

P.S. Yukhymets<sup>1</sup>, L.J. Yurko<sup>1</sup>, S.V. Kobelsky<sup>2</sup>, V.I. Kravchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU, 11 Kazymyr Malevych, Kyiv, 03150. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of NASU, 2 Timiriyazivs'ka str., Kyiv, 01014, Ukraine. E-mail: ips@ipp.kiev.ua

The paper deals with comparative analysis of some equations for calculation of stresses in a corrosion damage zone on pipeline surface. Stresses calculated by FEA in the area of volumetric surface defects were used as the reference values. The geometric parameters required for calculations were presented as a corresponding set of random independent values that varied within certain limits. Optimal dependencies were determined, the application of which provides moderately conservative values and a relatively narrow range of low values of stress concentration factor, when calculating the maximum stresses in the defects on the outer and inner surfaces, respectively. Ref. 19, Tabl. 3, Fig. 5.

Keywords: stress concentration, corrosion defects, pipelines

Надійшла до редакції 19.11.2019