

УДК 539.4

С.М. Банько<sup>1</sup>  
С.В. Кобельський<sup>1</sup>  
В.В. Харченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Інститут проблем міцності ім. Г.С.Писаренка НАН України  
Тимірязєвська вул., 2, м. Київ, Україна. 01014

## ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПОЛОГО ЦИЛІНДРА З ДЕФЕКТОМ У ВИГЛЯДІ КАВЕРНИ З ТРИЩИНОЮ

Представлено результати розрахунків напруженого стану полого циліндра з дефектом у вигляді тріщини, яка знаходиться в вершині каверни. Проаналізовано вплив геометричних параметрів каверни і тріщини на результати обчислень коефіцієнтів інтенсивності напружень та розкриття у вершині тріщини. Результати розрахунків порівнювали з відомими чисельними розв'язками про розтяг полого циліндра з тріщиною.

**Ключові слова:** напружений стан, тріщина, каверна, коефіцієнт інтенсивності напружень.

**Вступ.** При експлуатації парогенераторів ПГВ-1000 у складі атомних енергетичних установок у вузлах з'єднання «гарячого» колектора з патрубком парогенератора виявлено дефекти у вигляді тріщин, що беруть початок з вершини каверни.

У публікаціях [1-5] фахівців України та Росії, присвячених розрахунковому обґрунтуванню міцності вузла з'єднання, розрахунки напружено-деформованого стану (НДС) представлені без врахування дефекту. Результати досліджень щодо впливу геометричних параметрів дефекту у вигляді каверни в зоні галтельного переходу вузла з'єднання на його напружено-деформований стан представлені в роботах [6-8].

Задача дослідження напруженого стану в вузлі з'єднання при наявності в ньому дефекту зазначеного типу вирішується шляхом розв'язання ряду модельних задач про напружений стан полого циліндра з дефектом у вигляді тріщини, яка знаходиться в вершині каверни

Мета роботи. Дослідити вплив геометричних параметрів каверни і тріщини на розрахункові значення коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН) та розкриття у вершині тріщини.

**Постановка задачі.** Розглядали задачу про розтяг полого циліндра (рис. 1) із зовнішнім діаметром  $D_1=2.2$  м, внутрішнім діаметром  $D_2=2$  м, висотою  $2H=2$  м з внутрішньою і зовнішньою крайовою кільцевою каверною з тріщиною, що знаходиться в її вершині.

На торцях циліндра задавали рівномірно розподілене навантаження інтенсивністю  $q=100 \text{ МПа}$ . Зважаючи на симетрію задачі, розглядали сектор з кутом  $\pi/40$ . Коефіцієнт Пуассона задавали  $\nu=0.3$ , модуль пружності матеріалу -  $E=2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ . Задачу розв'язували в пружній постановці.

Розрахунки проведено для чотирьох варіантів взаємного розташування

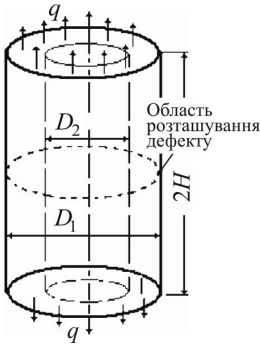


Рис. 1. Задача про розтяг полого циліндра з внутрішньою і зовнішньою крайовою кільцевою тріщиною, що бере початок з каверни

каверни і тріщини. В перших двох розглядали неглибоку зовнішню (внутрішню) кільцеву тріщину, вершина якої знаходилась на відстані  $c$  від вершини каверни (рис. 2). В наступних двох розглядали глибоку зовнішню (внутрішню) кільцеву тріщину, а відстань між вершиною тріщини і вершиною каверни варіювали величиною параметра  $k_1$  (рис. 3).

Величину параметру  $c$  сітки скінченних елементів, що розповсюджувалась вздовж фронту тріщини, для всіх варіантів приймали  $1/20$  товщини  $t$  стінки циліндра, величина параметра  $\delta$  сітки складала  $2/3 c$ .

Розв'язано ряд модельних задач з наступними відношеннями глибини дефекту  $a=k_1\delta+c$  до товщини стінки  $t$ :  $a/t=0.1, 0.3, 0.5, 0.7$ . Висоти  $h$  каверни

приймали:  $1.1\delta, 1.5\delta, 2.4\delta, 6.0\delta, 8.0\delta, 10.0\delta$ .

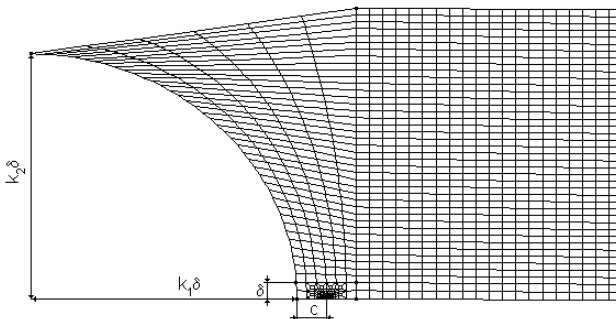


Рис. 2. Скінченно-елементна модель для задач першого та другого варіанту

В задачах третього та четвертого варіантів (рис. 3) моделювали, відповідно, зовнішню та внутрішню кільцеву тріщину. Параметр сітки  $\delta$ , приймали  $2/3$  глибини тріщини. Відношення глибини дефекту до

товщини стінки  $(k_3\delta + k_1\delta + c)/t$  стали і дорівнює для зовнішньої тріщини 0.8, для внутрішньої – 0.7. Розв'язано ряд задач з наступними значеннями глибини каверни:  $b=1\delta, 5\delta, 7\delta, 9\delta$  та значеннями висоти каверни:  $h=1.1\delta, 1.5\delta, 2\delta, 4\delta, 6\delta, 10\delta$ .

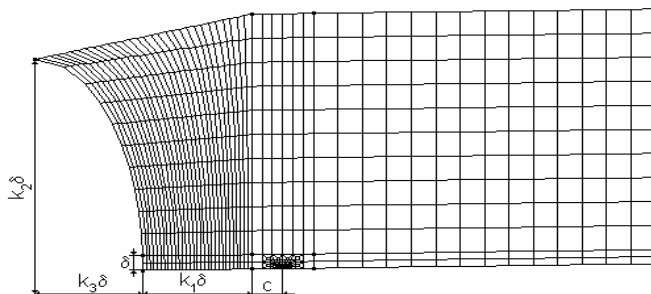


Рис. 3. Скінченно-елементна модель для задач третього та четвертого варіанту

Результати розрахунку КІН порівнювали з відомими чисельними розв'язками задач про розтяг полого циліндра з зовнішньою і внутрішньою тріщиною [9, 10].

**Результати.** На рис. 6 для задач першого варіанту представлені порівняльні результати розрахунку КІН для різних відношень глибини дефекту до товщини стінки циліндра ( $a/t$ ) в залежності від висоти каверни.

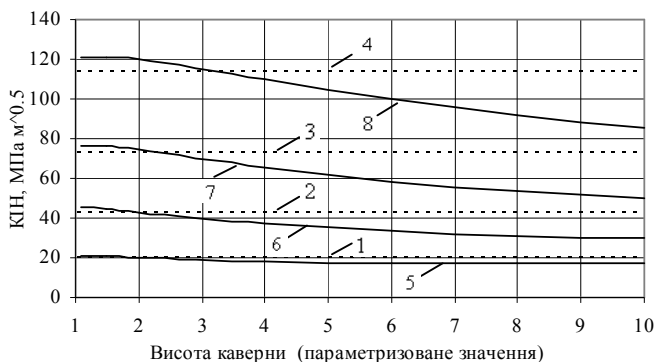


Рис. 6. Графіки розподілу КІН; зовнішня тріщина; задача першого варіанту:  
 1 - розв'язок [9] для  $a/t=0.1$ , 2 - розв'язок [9] для  $a/t=0.3$ , 3 - розв'язок [9] для  $a/t=0.5$ ,  
 4 - розв'язок [9] для  $a/t=0.7$ , 5 - чисельний розв'язок для  $a/t=0.1$ , 6 - чисельний розв'язок для  
 $a/t=0.3$ , 7 - чисельний розв'язок для  $a/t=0.5$ , 8 - чисельний розв'язок для  $a/t=0.7$

Як видно з рис. 6, значення КІН при зменшенні висоти  $h$  каверни зростають для всіх відношень  $a/t$  і при певній висоті каверни розв'язання задачі з тріщиною стає неконсервативним. На рис. 7 показано, як в залежності від відношення  $a/t$  змінюється значення висоти каверни, нижче якого чисельний розв'язок задачі з тріщиною є неконсервативним.

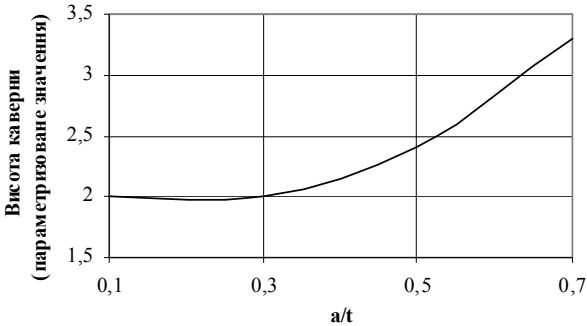


Рис. 7. Значення висоти каверни, нижче якого розв'язок без врахування каверни є неконсервативним в залежності від відношення  $a/t$

На рис. 8 для задач першого варіанту показані графіки розподілу КІН в залежності від відношення  $a/t$  для різних значень висоти каверни.

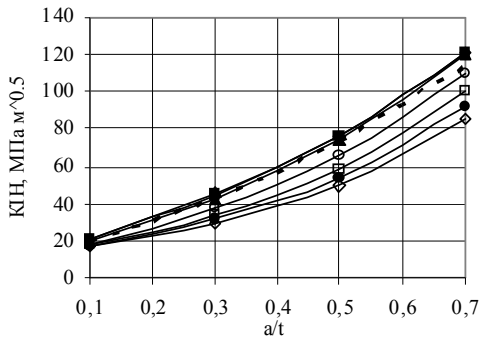


Рис. 8. Графіки розподілу КІН; зовнішня тріщина; задача першого варіанту:

--- — розв'язок [9];  $\blacklozenge$  -  $h=1,1\delta$ ,  $\blacksquare$  -  $h=1,5\delta$ ,  $\blacktriangle$  -  $h=2\delta$ ,  $\circ$  -  $h=4\delta$ ,  $\square$  -  $h=6\delta$ ,  $\bullet$  -  $h=8\delta$ ,  $\diamond$  -  $h=10\delta$

Як видно з приведених графіків, для каверн висотою  $h=1,1\delta$ ,  $1,5\delta$ ,  $2\delta$  значення КІН вищі, ніж для чисельного розв'язку задачі з тріщиною. Відповідно при збільшенні значення висоти каверни значення КІН зменшуються.

На рис. 9 для задач другого варіанту представлені порівняльні результати розрахунку КІН для різних відношень глибини дефекту до товщини стінки циліндра ( $a/t$ ) в залежності від висоти каверни.



Рис. 9. Графіки розподілу КІН; внутрішня тріщина; задача другого варіанту: 1 - розр'язок [10] для  $a/t=0.1$ , 2 - розр'язок [10] для  $a/t=0.3$ , 3 - розр'язок [10] для  $a/t=0.5$ , 4 - розр'язок [10]  $a/t=0.7$ , 5 - чисельний розр'язок для  $a/t=0.1$ , 6 - чисельний розр'язок для  $a/t=0.3$ , 7 - чисельний розр'язок для  $a/t=0.5$ , 8 - чисельний розр'язок для  $a/t=0.7$

Як видно з рис. 9, значення КІН при зменшенні висоти каверни зростають для всіх відношень  $a/t$  і певній висоті каверни розр'язання задачі з тріщиною також є неконсервативним. На рис. 10 показано, як в залежності від відношення  $a/t$  змінюється значення висоти каверни, нижче якого чисельний розр'язок задачі з тріщиною є неконсервативним.

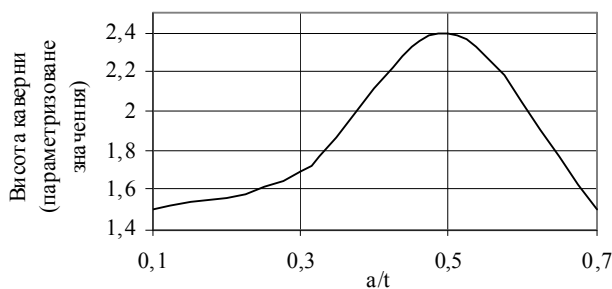


Рис. 10. Значення висоти каверни, нижче якого розр'язок без врахування каверни є неконсервативним в залежності від відношення  $a/t$

На рис. 11 для задач другого варіанту представлені графіки розподілу КІН в залежності від відношення  $a/t$  для різних значень висоти каверни.

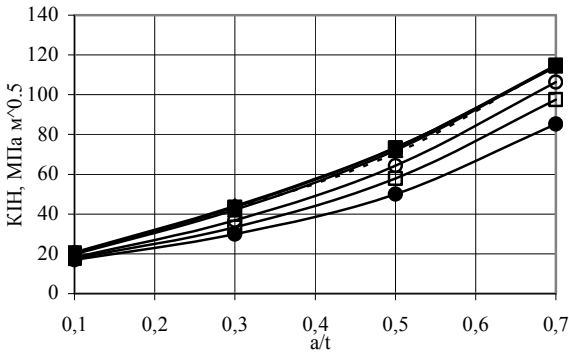


Рис. 11. Графіки розподілу КІН; внутрішня тріщина; задача другого варіанту:

--- розв'язок [10];  $\blacklozenge$  -  $h=1.1\delta$ ,  $\blacksquare$  -  $h=1.5\delta$ ,  $\blacktriangle$  -  $h=2\delta$ ,  $\circ$  -  $h=4\delta$ ,  
 $\square$  -  $h=6\delta$ ,  $\bullet$  -  $h=10\delta$

З графіків представлених на рис. 11 слідує, що для каверн висотою  $h=1.1\delta$ ,  $1.5\delta$ ,  $2\delta$  значення КІН вищі, ніж для чи розв'язку задачі з тріщиною. При збільшенні значення висоти каверни значення КІН зменшуються.

На рис. 12 для задач третього варіанту представлені графіки розподілу КІН для різних глибин каверни в залежності від висоти. На рис. 13 представлені графіки розподілу КІН в залежності від глибини каверни для різних значень висоти. Відношення глибини дефекту до товщини стінки циліндра  $a/t$  сталі і становить 0.8.

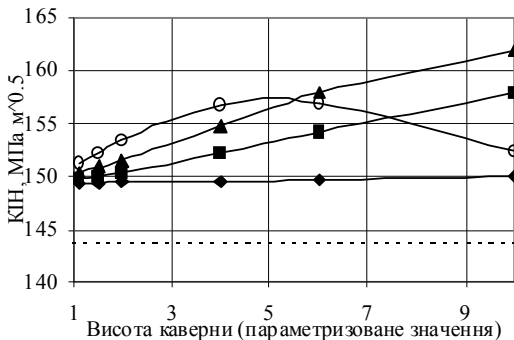


Рис. 12. Графіки розподілу КІН; зовнішня тріщина; задача третього варіанту:

--- розв'язок [9];  $\blacklozenge$  -  $b=1\delta$ ;  $\blacksquare$  -  $b=5\delta$ ;  $\blacktriangle$  -  $b=7\delta$ ;  $\circ$  -  $b=9\delta$

Як видно з представлених графіків, значення КІН для всіх варіантів глибини та висоти каверни вищі, ніж для чисельного розв'язку задачі з

тріщиною. Тобто чисельний розв'язок є неконсервативним. Крім того, слід відмітити, що для глибоких каверн ( $b=9\delta$ ) при висоті  $h=6\delta$  значення КІН знижуються.

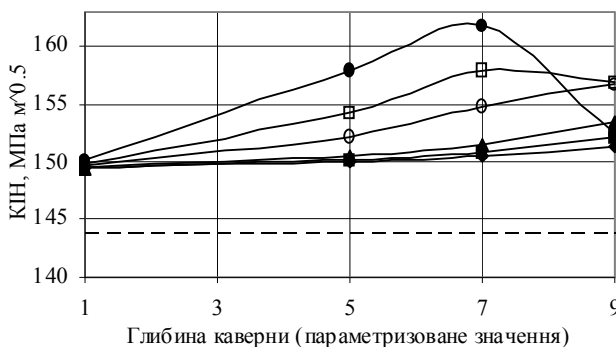


Рис. 13. Графіки розподілу КІН; зовнішня тріщина; задача третього варіанту:  
 --- розв'язок [9];  $\blacklozenge$  -  $h=1.1\delta$ ,  $\blacksquare$  -  $h=1.5\delta$ ,  $\blacktriangle$  -  $h=2\delta$ ,  $\circ$  -  $h=4\delta$ ,  
 $\bullet$  -  $h=6\delta$ ,  $\bullet$  -  $h=10\delta$

На рис. 14 для задачі четвертого варіанту представлено графіки розподілу КІН для різних глибин каверни в залежності від висоти. На рис. 15 представлено графіки розподілу КІН в залежності від глибини каверни для різних значень висоти. Відношення глибини дефекту до товщини стінки циліндра  $a/t$  стає і становить 0,7.

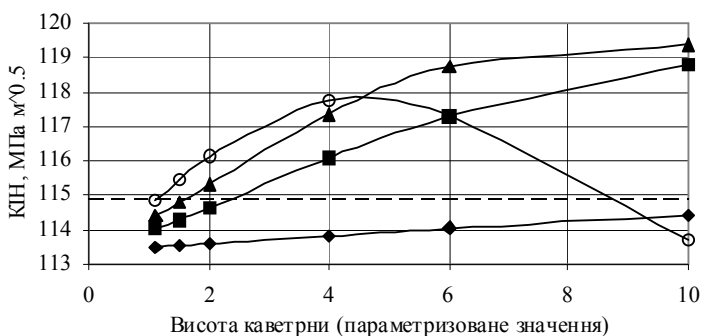


Рис. 14. Графіки розподілу КІН; внутрішня тріщина; задача четвертого варіанту:  
 --- розв'язок [10];  $\blacklozenge$  -  $b=1\delta$ ,  $\blacksquare$  -  $b=5\delta$ ,  $\blacktriangle$  -  $b=7\delta$ ,  $\circ$  -  $b=9\delta$

З отриманих результатів випливає, що чисельний розв'язок стає неконсервативним зі збільшенням глибини і висоти каверни.

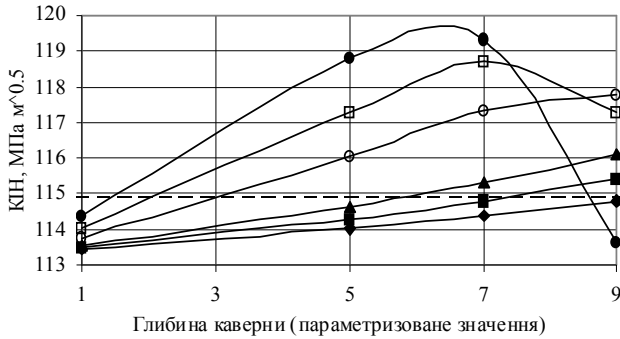


Рис. 15. Графіки розподілу КІН; внутрішня тріщина; задача четвертого варіанту:  
 --- розв'язок [10]; ◆ -  $h=1.1\delta$ , ■ -  $h=1.5\delta$ , ▲ -  $h=2\delta$ , ○ -  $h=4\delta$ , □ -  $h=6\delta$ , ● -  $h=10\delta$

На рис. 16 представлено графіки розподілу КІН в залежності від висоти каверни для внутрішньої тріщини при використанні моделей різного варіанту каверни з тріщиною. Відношення глибини дефекту до товщини стінки становить 0,7. Для глибокої тріщини глибину каверни  $b$  приймали рівною 1δ, 5δ, 7δ, 9δ.



Рис. 16. Графіки розподілу КІН; внутрішня тріщина: ● - мілка тріщина, □ -  $b=1\delta$  (глибока тріщина), ○ -  $b=5\delta$  (глибока тріщина), Δ -  $b=7\delta$  (глибока тріщина), × -  $b=9\delta$  (глибока тріщина)

З приведених графіків слідуює, що для мілкої тріщини зі збільшенням висоти каверни КІН значно знижується в порівнянні з глибокою тріщиною. Тобто модель з мілкою тріщиною дає занижені результати.

В табл. 1- 4 приведені значення КІН для різних варіантів конфігурації дефекту.



Таблиця 1

Значення КІН для задач першого варіанту

Висота каверни	Коефіцієнт інтенсивності напружень, $МПа \cdot м^{0.5}$			
	a/t			
	0.1	0.3	0.5	0.7
1.1δ	21.02	45.21	76.70	120.78
1.5δ	20.57	44.52	76.26	121.27
2δ	19.96	43.15	74.77	120.38
4δ	18.35	37.26	65.82	110.42
6δ	17.63	33.59	58.56	99.99
8δ	17.25	31.31	53.48	91.85
10δ	17.01	29.70	49.66	85.42
Розв'язок [9]	20.34	42.98	73.12	114.07

Таблиця 2

Значення КІН для задач другого варіанту

Висота каверни	Коефіцієнт інтенсивності напружень, $МПа \cdot м^{0.5}$			
	a/t			
	0.1	0.3	0.5	0.7
1,1δ	20.80	44.01	73.48	114.08
1,5δ	20.38	43.44	73.28	114.89
2δ	19.80	42.21	72.10	114.45
4δ	18.24	36.79	64.29	106.40
6δ	17.56	33.42	57.87	97.53
10δ	16.98	29.95	50.07	85.24
Розв'язок [10]	20.52	42.723	70.5	114.86

Таблиця 3

Значення КІН для задач третього варіанту

Висота каверни	Коефіцієнт інтенсивності напружень, $МПа \cdot м^{0.5}$			
	Глибина каверни			
	1δ	5δ	7δ	9δ
1.1δ	149.35	149.86	150.38	151.36
1.5δ	149.38	150.11	150.88	152.27
2δ	149.42	150.46	151.58	153.42
4δ	149.54	152.21	154.85	156.72
6δ	149.68	154.28	157.97	156.98
10δ	150.05	157.91	161.84	152.41
Розв'язок [9] a/t=0.8				143.68

Таблиця 4

Значення КІН для задач четвертого варіанту

Висота каверни	Коефіцієнт інтенсивності напружень, $MПа \cdot м^{0.5}$			
	Глибина каверни			
	1 $\delta$	5 $\delta$	7 $\delta$	9 $\delta$
1.1 $\delta$	113.47	114.04	114.38	114.83
1.5 $\delta$	113.52	114.30	114.80	115.42
2 $\delta$	113.58	114.64	115.33	116.12
4 $\delta$	113.80	116.04	117.35	117.75
6 $\delta$	114.02	117.29	118.70	117.29
10 $\delta$	114.40	118.80	119.35	113.69
Розв'язок [10] $a/t=0.7$ 114.86				

На рис. 17 приведено графіки розподілу розкриття у вершині тріщини в залежності від висоти каверни для мілкої і глибокої внутрішньої тріщини. Відношення глибини дефекту до товщини стінки становить 0.7.

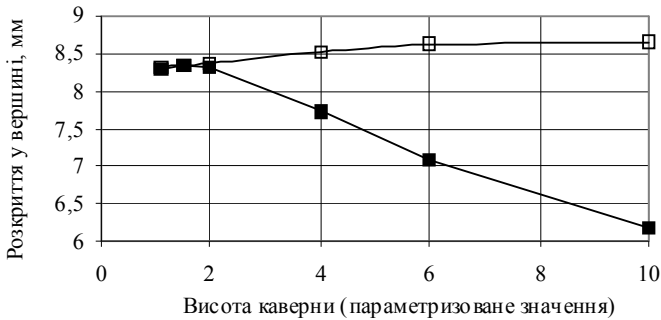


Рис. 17. Розкриття у вершині тріщини: ■ – мілка тріщина; □ - глибока тріщина

З представлених результатів слідує, що для мілкої тріщини зі збільшенням висоти каверни значення розкриття у вершині значно зменшується. З отриманих результатів впливає також, що модель з глибокою тріщиною дає вищі значення КІН і розкриття у вершині тріщини, при чому ці значення зростають зі збільшенням висоти і глибини каверни.

**Висновки.** В рамках даної роботи розв'язано ряд модельних задач про розтяг полого циліндра з дефектом у вигляді тріщини, що бере початок з вершини каверни. Отримані результати порівняли з відомими чисельними розв'язками про розтяг циліндра з тріщиною.

Аналіз отриманих результатів розв'язання модельних задач дозволяє зробити наступний висновок: чисельний розв'язок дає занижені результати розрахунку КІН для всіх глибоких зовнішніх тріщин з каверною, для глибоких внутрішніх при глибині понад  $5\delta$  і висоті понад  $4\delta$ . Для неглибоких внутрішніх і зовнішніх тріщин чисельний розв'язок дає занижені результати розрахунку КІН при висоті каверни до  $2\delta$ .

Використання моделей з неглибокою тріщиною в вершині каверни призводить до занижених значень КІН і розкриття у вершині тріщини в порівнянні з глибокою тріщиною. Отже, глибока тріщина є більш небезпечною.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Степанов Г.В., Харченко В.В., Бабуцкий А.И. и др. Оценка напряженно-деформированного состояния узла сварного соединения “горячего” коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 АЭС// Пробл. прочности.- 2003, №5. с.142-153.
2. Драгунов Ю.Г., Петрова О.Ю., Лякишев С.Л. и др. Повышение надежности эксплуатации коллекторов парогенераторов ПГВ-1000, -1000М – [Атомная энергия](#). – 2008. – Том 104. – №1. – С. 9–13.
3. Степанов Г.В., Харченко В.В., Бабуцкий А.И. и др. Влияние компоновки реакторов ВВЭР «малой» и «большой» серий атомных электростанций на напряженно-деформированное состояние узла приварки коллектора к патрубку парогенератора – Пробл. прочности. – 2007. – №5. – С. 114–120.
4. Лякишев С.Л., Харченко С.А., Кучерявченко А.В., Коротаев Н.Ф. Оптимизация конструкции узла приварки коллектора к корпусу парогенератора – Сб.трудов 7-го Международного семинара по горизонтальным парогенераторам. – 2006. – ФГУП ОКБ «Гидропресс», Подольск, Россия.
5. Лякишев С.Л., Трунов Н.Б., Харченко С.А., и др. Разработка и обоснование мероприятий по обеспечению надежной и безопасной эксплуатации сварных соединений № 111 парогенератора ПГВ-1000М – Труды 6-й Международной научно-технической конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – 2009. – ФГУП ОКБ «Гидропресс», Подольск, Россия.
6. Банько С.Н., Кобельский С.В., Кравченко В.И. Численный анализ напряженно-деформированного состояния в вершине каверны, расположенной в галтели узла приварки коллектора к корпусу парогенератора ПГВ-1000М – Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2012. – Вып. 35. – С. 214 – 220.
7. Банько С.М. Напружений стан вузла з'єднання колектора з корпусом парогенератора ПГВ-1000М з каверною – Вісник Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя. – 2012. – №3 (67). – С. 56 – 63.
8. Банько С.М. Аналіз впливу геометричних параметрів каверни в галтелі вузла з'єднання колектора з корпусом парогенератора ПГВ-1000М на його напружений стан //Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2013.– Вип.91. – С.181–187.
9. Мураками Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. – М.: Мир. 1990. – 1013 с.
10. Саврук М.П. Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами. – К.: Наукова думка. 1988. – 620 с.

## REFERENCES

1. *Stepanov H.V., Kharchenko V.V., Babutskyy A.Y. y dr.* Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyannya uzla svarnoho soedynenyya "goryacheho" kollektora s patrubkom paroheneratora PGV-1000 AES „Evaluation of the stress-strain state of the welded joint assembly "hot" collector pipe steam generator PGV-1000 NPP” - Stress-strain state evaluation of a welded joint of hot collector to nozzle of NPP steam generator PGV-1000 // Probl. prochnosty.- 2003, No. 5. s.142-153.
2. *Drahunov Yu.H., Petrova O.Yu., Lyakyshev S.L. y dr.* Povishenye nadezhnomy ekspluatatsyy kollektorov paroheneratov PGV-1000, -1000M – Increasing the operational reliability of the collectors of PGV-1000,-1000M steam generators – Atomnaya enerhiya. – 2008. – Tom 104. – No. 1. – S. 9–13.
3. *Stepanov H.V., Kharchenko V.V., Babutskyy A.Y. y dr.* Vliyanye komponovky reaktorov VVER «maloy» y «bol'shoy» seryy atomnikh elektrostantsyy na napryazhenno-deformirovannoye sostoyanye uzla pryvarky kollektora k patrubku paroheneratora – Effect of the layout of small-and large-series WWER-1000 reactors of nuclear power plants on the stress-strain state of the header-steam generator connector weldment – Probl. prochnosty. – 2007. – No. 5. – S. 114–120.
4. *Lyakyshev S.L., Kharchenko S.A., Kucheryavchenkov A.V., Korotaev N.F.* Optymyzatsyya konstruksyy uzla pryvarky kollektora k korpusu paroheneratora – Optimizing the design of the welded joint between the header and steam generator shell – Sb.trudov 7-ho Mezhdunarodnoho seymnara po horizontal'nim paroheneratoram. – 2006. – FGUP OKB «Hydropress», Podol'sk, Rossyya.
5. *Lyakyshev S.L., Trunov N.B., Kharchenko S.A., y dr.* Razrabotka y obosnovanye meropryyatyy po obespechenyyu nadezhnoy y bezopasnoy ekspluatatsyy svarnikh soedynenyy № 111 paroheneratora PGV-1000M – Development and justification of measures for ensuring reliable and safe operation of welded joints No. 111 in PGV-1000M steam generators – Trudi 6-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnycheskoy konferentsyya «Obespechenye bezopasnosti AES s VVER». – 2009. – FGUP OKB «Hydropress», Podol'sk, Rossyya.
6. *Ban'ko S.N., Kobel'skyy S.V., Kravchenko V.Y.* Chyslenniy analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyannya v vershyne kaverni, raspolozhennoy v haltely uzla pryvarky kollektora k korpusu paroheneratora PGV-1000M – Numerical analysis of the stress-strain state at the tip of a cavity near the fillet of the welded joint between the header and the shell of PGV-1000M steam generator – Nadezhnost' y dolhovechnost' mashyn y sooruzhenyy. – 2012. – Vip. 35. – S. 214 – 220.
7. *Ban'ko S.M.* Napruzhenyy stan vuzla z"yednannyya kolektora z korpusom paroheneratora PGV-1000M z kavernoy – Stress state of the welded joint with a cavity between the header and the shell of PGV-1000M steam generator – Visnyk Ternopil's'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu im. I. Pulyuya. – 2012. – No. 3 (67). – S. 56 – 63.
8. *Ban'ko S.M.* Analiz vplyvu heometrychnykh parametriv kaverny v halteli vuzla z"yednannyya kolektora z korpusom paroheneratora PGV-1000M na yoho napruzhenyy stan – Analysis of the influence of geometrical parameters of the cavity near the fillet of the welded joint between the header and the shell of PGV-1000M steam generator on its stress state //Opir materialiv i teoriya sporud: Nauk.-tekh. zbirnyk. – K.: KNUBA, 2013.– Vyp.91. – S.181–187.
9. *Murakami Yu.* Spravochnyk po koeffytsyentam yntensyvnoyy napryazhenyy. – Handbook of stress intensity factors – M.,: Myr. 1990. – 1013 s.
10. *Savruk M.P.* Koeffytsyenti yntensyvnoyy napryazhenyy v telakh s treshchynamy. – The stress intensity factors in the bodies with cracks – K.,: Naukova dumka. 1988. – 620 s.

*Стаття надійшла до редакції 24.02.2014 р.*

*Банько С.Н., Кобельский С.В., Харченко В.В.*

#### **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛОГО ЦИЛИНДРА С ДЕФЕКТОМ В ВИДЕ КАВЕРНЫ С ТРЕЩИНОЙ**

Представлены результаты расчетов напряженного состояния полого цилиндра с дефектом в виде трещины, которая находится на вершине каверны. Проанализировано влияние геометрических параметров каверны и трещины на результаты вычислений коэффициентов интенсивности напряжений и раскрытие в вершине трещины. Результаты расчетов сравнивались с известными численными решениями о растяжении полого цилиндра с трещиной.

**Ключевые слова:** напряженное состояние, трещина, каверна, коэффициент интенсивности напряжений.

*Ban'ko S.N., Kobelsky S.V., Kharchenko V.V.*

#### **NUMERICAL SIMULATION OF THE STRESS STATE OF A HOLLOW CYLINDER WITH A DEFECT IN THE FORM OF A CAVITY WITH A CRACK**

The results of calculating the stress state of a hollow cylinder with a defect in the form of cracks, which is at the top of the cavity is presented. The influence of the geometric parameters of the cavity and crack on the calculations of stress intensity factors and crack opening in the top is analyzed. The calculation results are compared with the available numerical solutions of stretching hollow cylinder with a crack.

**Key words:** stress state, crack, cavity, stress intensity factor.