

УДК 539.4

С.В. Кобельський, канд. техн. наук

ВИКОРИСТАННЯ КОНЦЕПЦІЇ J -ІНТЕГРАЛА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИН КОЕФІЦІЄНТІВ ІНТЕНСИВНОСТІ НАПРУЖЕНЬ ДЛЯ КОРПУСА РЕАКТОРА ВВЕР-1000 ПРИ АВАРІЙНОМУ ОХОЛОДЖЕННІ

Для характерного режиму аварійного охолодження корпусу реактора ВВЕР-1000 проаналізовано результати визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень з використанням концепції J -інтеграла на сітках скінченних елементів різної густини.

Вступ. Забезпечення умов безпечної експлуатації атомних енергетичних установок і, зокрема корпусів реакторів (КР), як найбільш важливих їх елементів, - одне з важливих науково-практичних завдань. Одним з перспективних шляхів вирішення цього завдання є математичне моделювання кінетики термомеханічного стану корпусу реактора, що потребує розв'язання нестационарних нелінійних задач термомеханіки. Розрахункове обґрунтування міцності КР проводиться на основі аналізу визначальних величин параметрів механіки руйнування – коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН).

Складність задачі, що розглядається, значний об'єм розрахунків, необхідність проведення багатоваріантних розрахунків практично унеможливлене під час розв'язання практичних задач методом скінченних елементів (МСЕ) обґрунтування збіжності отриманих результатів. У більшості випадків для конструкцій складної форми розрахунки проводяться на сітках скінченних елементів з величиною кроку в околиці точок фронту тріщини 0,5–1 мм.

Метою роботи є аналіз результатів визначення КІН, які розраховуються з використанням концепції J -інтеграла на різних сітках скінченних елементів.

Постановка задачі. Для характерного режиму аварійного охолодження (термошоку) проаналізовані дві розрахункові моделі КР ВВЕР-1000 – з вбудованою та без вбудованої тріщини (рис. 1). Постулюється кільцева напівліптична піднаплавочна тріщина глибиною $a=15$ мм зі співвідношенням напівосей $a/c=1/3$ [1, 2], яка розташована на рівні зварного з'єднання № 4. Використовується процедура вбудовування тріщини в скінченноелементну модель фрагмента корпусу.

Метод розрахунку та використане програмне забезпечення. Задача вирішується у тривимірній постановці з використанням змішаної схеми методу скінченних елементів (ЗМСЕ) [3]. Схема реалізована у розрахунковому коді **SPACE-RELAX**, який за розпорядженням НАЕК “Енергоатом” № 124-р від 12.02.2010 включено до переліку розрахункових кодів, дозволених до використання при обґрунтуванні безпеки ядерних енергетичних установок.

У рамках ЗМСЕ розроблено нові просторові змішані скінченні елементи - у формі шестигранної 8-вузлової призми (ЗКЕ-1) та у формі тетраедра (ЗТЕ-1), з апроксимацією напружень і деформацій за допомогою інтерполяційних функцій, визначених відносно вершин і центру елементів [4, 5]. Як показано в [4], сумісне використання елементів ЗТЕ-1 і ЗКЕ-1 забезпечує можливість отримання розв'язку задачі в пружнопластичній постановці, що не суперечить теоретичним положенням мілкомасштабної пластичної течії для розподілу напружень в околиці вершини тріщини.

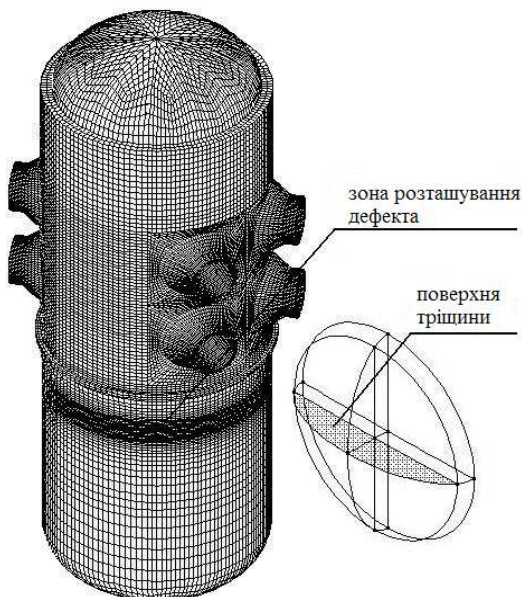


Рис. 1. Розрахункова модель корпусу реактора ВВЕР-1000

При розв'язанні задачі в пружнопластичній постановці процес навантаження розбивається на окремі часові етапи, в межах кожного з яких розв'язується пружнопластична задача з урахуванням залишкових пластичних деформацій, визначених на попередньому етапі. Для

розв'язання пружнопластичної задачі на поточному етапі навантаження використовується двохступеневий ітераційний процес. Задача теорії пластичності розв'язується методом змінних параметрів пружності, а на внутрішніх кроках по пружності задачі розв'язуються з використанням методу спряжених градієнтів з нульовим початковим наближенням.

Визначення величин коефіцієнтів інтенсивності напружень. Для визначення величин КІН використовується концепція J -інтеграла. В задачах лінійної та нелінійної теорії пружності, а також деформаційної теорії пластичності, величина J -інтеграла характеризує швидкість вивільнення енергії при віртуальному нескінченно малому підростанні тріщини [6, 7]. Можливість використання концепції J -інтеграла обмежена наступними вимогами: матеріал є нелінійно-пружним та однорідним, при пружнопластичному деформуванні навантаження зростає пропорційно одному параметру, тобто можливо використовувати деформаційну теорію пластичності. Використання J -інтеграла в теорії течії теоретично не обґрунтовано.

В представленій роботі для обчислення величини J -інтеграла використано запропонований Г.П. Нікішковым метод еквівалентного об'ємного інтегрування (ЕОІ) [8]. В методі ЕОІ енергетичний J -інтеграл визначається як інтеграл по поверхні A_ε малої трубки радіусу ε та довжиною Δ , коаксіальної до лінії фронту тріщини (рис. 2) і, після перетворень, представляється у вигляді

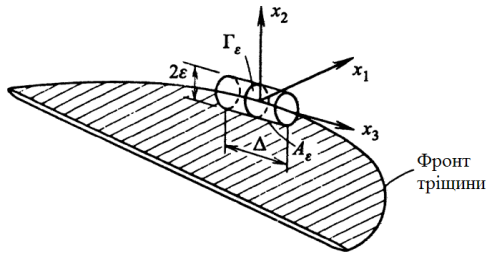


Рис. 2. Сегмент фронту тріщини та система координат

$$J_k = -\frac{1}{f} \int_{V-V_\varepsilon} \left(\frac{\partial}{\partial x_k} (W_s) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} s) \right) dV + \\ + \frac{1}{f} \int_{A_1+A_2} (W n_k - \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} n_j) s dA + \frac{1}{f} \int_{A_c} (W n_k - \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} n_j) s dA. \quad (1)$$

Тут V – об'єм трубки; V_ε – об'єм отвору навколо фронту тріщини; A_1 , A_2 – бокові поверхні трубки; A_c – поверхня тріщини; s – неперервна

безрозмірна функція; $f = \int_0^\Delta s dx_3$; $W = \int_0^{\varepsilon_{ij}^{ep}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^{ep}$ – щільність енергії деформації (робота напружень на механічній частині деформацій) (рис. 3).

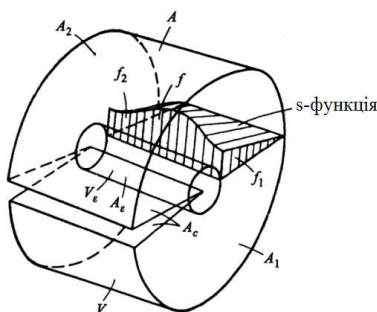


Рис. 3. Об'єм у вигляді диска докола сегменту фронту тріщини

використовується також формула інтегрування від початкового (нульового) стану до кінця етапу навантаження, що розглядається (3) (інтегрування по трикутнику, рис. 4).

$$\tilde{W}_1 = \frac{1}{2} \{\sigma_1\} \{\varepsilon_1\}, \quad \tilde{W}_2 = \frac{1}{2} \{\sigma_2\} \{\varepsilon_2\}, \quad \dots \quad (3)$$

В подальшому, “*J*-інтеграл, трикутник”, “*J*-інтеграл, трапеція” означає, що при обчисленні КІН за допомогою *J*-інтеграла, величина *W* обчислюється інтегруванням по трикутнику (трапеції). Якщо інше не обумовлено, вважається, що обчислення щільності енергії деформації виконується інтегруванням по трапеції.

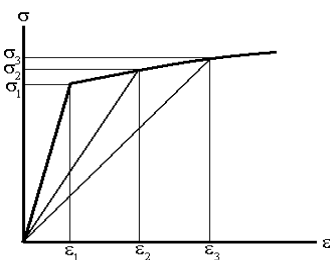


Рис. 4. Два способи обчислення щільності енергії деформації

Для обчислення величини *W*, що входить в (1), використана формула інтегрування по трапеції (2) в межах етапу навантаження, яка дозволяє враховувати зміну напружень і деформацій в процесі навантаження (рис. 4)

$$W_i = \frac{1}{2} \sum_i (\{\sigma_i\} + \{\sigma_{i+1}\}) (\{\varepsilon_{i+1}\} - \{\varepsilon_i\}). \quad (2)$$

Тут та надалі індексами позначені номери етапів навантаження.

Але в практиці розрахунків використовується також формула інтегрування від початкового (нульового) стану до кінця етапу навантаження, що розглядається (3) (інтегрування по трикутнику, рис. 4).

Обчислення КІН з використанням концепції *J*-інтеграла може проводитися при різному виборі об'єму *V_ε* отвору навколо фронту тріщини *i*, відповідно, поверхні *A_ε* малої трубки. На рис. 5 показано ряд контурів елементів навколо точки на фронті тріщини. В подальшому, “обчислення *J*-інтеграла по *n*-му контуру” означає, що об'єм *V_ε* охоплює контури елементів 1 ... *n*-1 навколо точки на фронті тріщини.

Розв'язання задачі в пружній постановці та в пружнопластичній без урахування історії навантаження. На рис. 6 наведені графіки температурної залежності відносних значень КІН, обчислених для найбільш глибокої точки тріщини на різних сітках, для різних об'ємів *V_ε*. Наведені на всіх графіках величини КІН нормувались величиною КІН, що

була визначена для тріщини з параметрами сітки 21×5.5 мкм при розбитті на тетраедри 5 шарів скінченних елементів навколо точки її фронту.

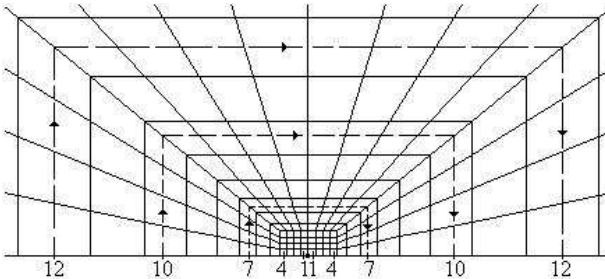
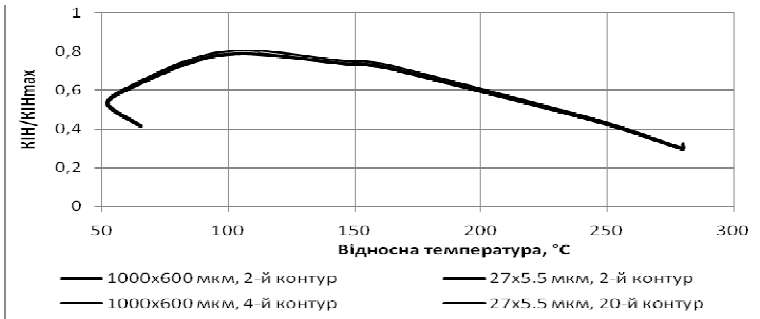
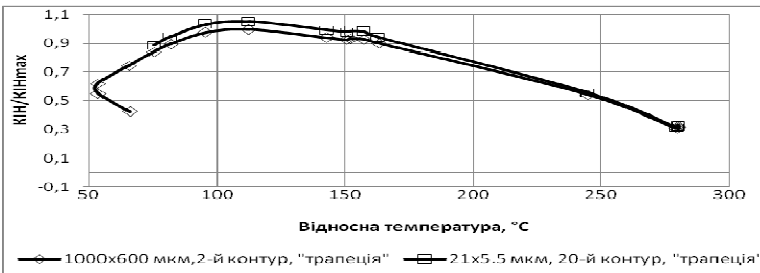


Рис. 5. Контури елементів навколо точки на фронті тріщини



a



b

Рис. 6. Температурна залежність відносних значень КІІ в найбільш глибокій точці тріщини: *a* – в задачі теорії пружності; *b* – в задачі теорії пластичності без урахування історії навантаження

З аналізу даних випливає, що при розв'язанні задачі в пружній постановці різниця у відносних величинах КІІ, обчислених на ближчих

та дальших контурах, не перевищує 3%. В задачі теорії пластичності без урахування історії навантаження для дальніх контурів (4-й для сітки 1000×600 мкм, 20-й для сітки 21×5.5 мкм) ця різниця склала 7%. Це узгоджується з рекомендаціями [8] стосовно того, що в якості V_e слід обирати шар елементів, що безпосередньо прилягає до фронту тріщини.

Розв'язання задачі в пружнопластичній постановці з урахуванням історії навантаження. При розв'язанні задачі в пружнопластичній постановці з урахуванням історії навантаження аналізувалась чуттєвість величин КІН, що визначались, до наступних факторів:

- вплив способу обчислення щільності енергії деформації;
- використання вихідної моделі КР з вбудованою тріщиною та без неї;
- використання сіток скінченних елементів різної густини;
- різна триангуляція зони в околиці фронту тріщини.

Аналіз впливу способу обчислення щільності енергії деформації. На графіках, наведених на рис. 7, аналізується вплив способу обчислення щільності енергії деформації на величину КІН при використанні концепції J -інтеграла.

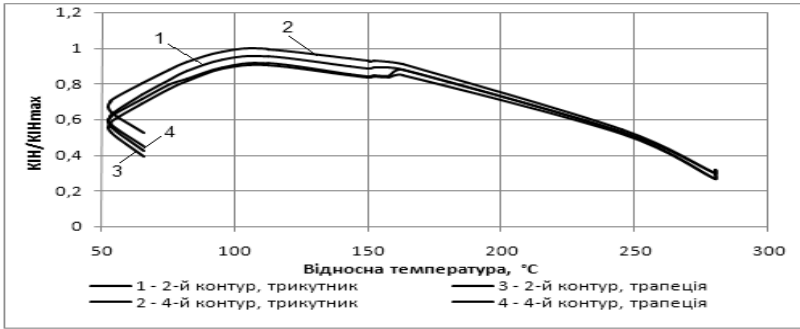
Розглядаються сітки 1000×600 мкм (рис. 7,а), 47,5×27,5 мкм (рис. 7,б), 21×5,5 мкм (рис. 7,в), результати зіставлені для різних варіантів вибору об'ємів V_e . Аналіз показав, що для всіх сіток і практично всіх розглянутих варіантів вибору об'ємів V_e , величини КІН, отримані при обчисленні щільності енергії деформації інтегруванням по трикутнику, виявились більшими від отриманих при обчисленні інтегруванням по трапеції. Відмінність тим більша, чим далі розташований вибраний об'єм V_e від точки на фронті тріщини. Під час вибору у вигляді V_e шару елементів, найближчого до точки фронту, найбільша відмінність становила для сітки 21×5,5 мкм $\approx 3\%$, для сітки 47,5×27,5 мкм $\approx 4\%$, для сітки 1000×600 мкм $\approx 9\%$.

Аналіз впливу наявності тріщини у вихідній моделі КР. На рис. 8 для задач, які розв'язували на трьох сітках (1000×600 мкм, 400×275 мкм, 47,5×27,5 мкм) за наступних умов:

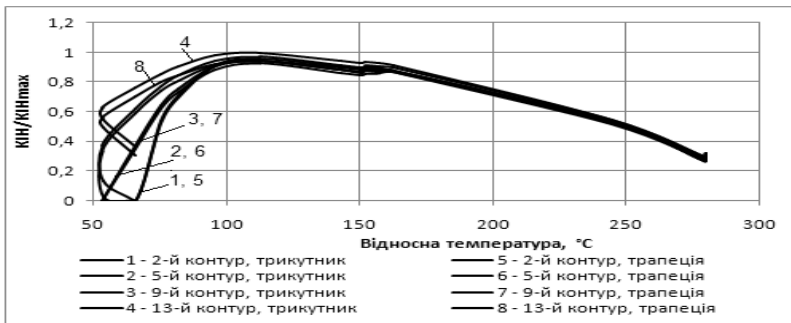
- 1 - вихідна модель КР з вбудованою тріщиною;
- 2 - вихідна модель КР без вбудованої тріщини,

представлені результати визначення параметрів руйнування – розкриття та КІН.

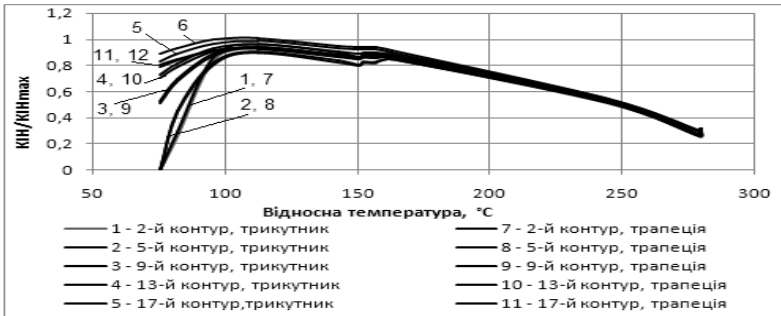
Аналіз результатів дозволяє зробити висновки про недоцільність вбудовування тріщини у вихідну повну модель КР.



а

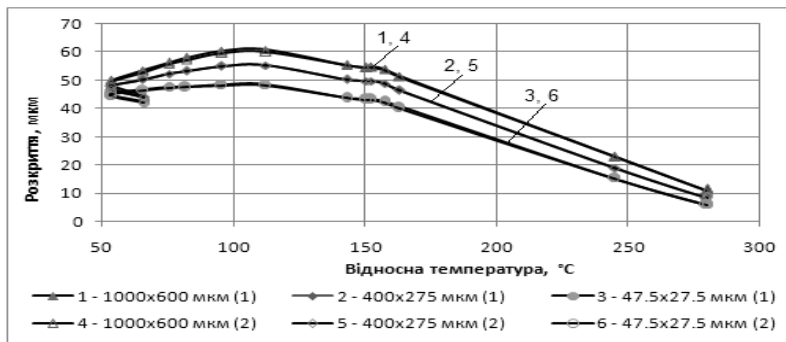


б

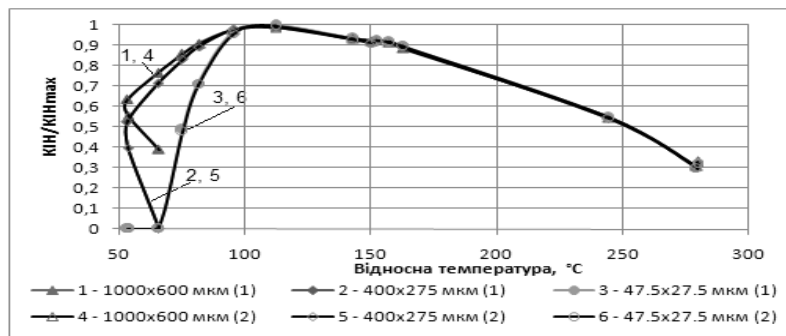


в

Рис. 7. Графіки відносних значень КІН, отримані для різних способів обчислення щільності енергії деформації: а – сітка 1000×600 мкм, б – сітка 47,5×27,5 мкм, в – сітка 21×5,5 мкм



а



б

Рис. 8. Графіки результатів розрахунку параметрів руйнування:
а – розкриття; б – відносних значень КІН

Характер графіків зміни КІН (рис. 8,б) показує, що на етапах активного навантаження вплив величини кроку сітки є мінімальним. Однак зі зменшенням кроку гілка графіка, що спадає, відхиляється все більше в правий бік та має тенденцію до перетворення у вертикальну. Так, для сітки $21 \times 5,5$ мкм останнє значення КІН отримане для моменту часу 2000 с, тоді як для сітки 1000×600 мкм отримані значення КІН до часу 6400 с. Очевидно, що результати визначення температури крихкості металу [2, 10], отримані при використанні цих даних, будуть різнитись.

Аналіз впливу розміру зони триангуляції в околиці фронту тріщини.
Триангуляція – це розбиття на тетраедри скінченних елементів в околиці фронту тріщини.

Для аналізу використані результати, отримані на сітці $21 \times 5,5$ мкм при розбитті на тетраедри 3, 5 і 9 шарів скінченних елементів, які оточують точку фронту тріщини (рис. 5).

Для етапів активного навантаження результати практично співпадають (відмінність не перевищує 1%). При розвантаженні зі збільшенням числа шарів тетраедрів гілка графіка, що спадає, стає менш крутою в області, яка не є важливою, наприклад, при визначенні температури крихкості металу.

Отже, можна стверджувати, що при розв'язанні задач достатньо розбивати на тетраедри три шари елементів в околиці точки фронту тріщини.

На рис. 9 зіставлені відносні значення КІН, розраховані за допомогою J -інтеграла для різних варіантів вибору об'ємів V_e при розбитті на тетраедри 3 і 9 шарів скінченних елементів, які оточують точку фронту тріщини.

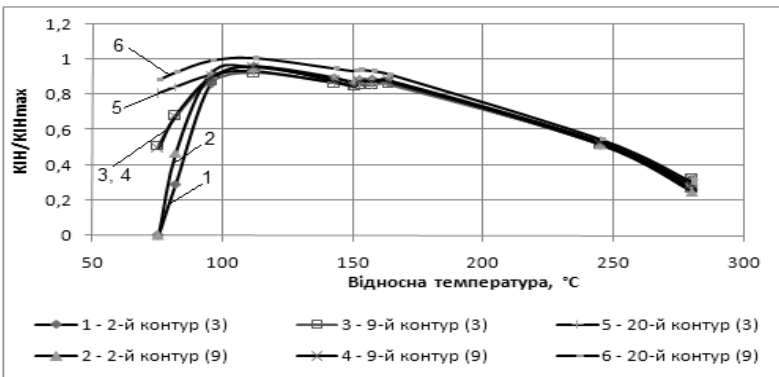


Рис. 9. Графіки відносних значень КІН, розрахованих при розбитті на тетраедри різного числа шарів елементів

Видно, що найбільше відрізняються результати, отримані при виборі в якості V_e шару елементів, розташованого якнайдалі від фронту тріщини, причому це справедливо як для етапів активного навантаження, так і для розвантаження.

Використання сіток різної густини. На рис. 10 співставлені відносні значення КІН, обчислені на сітках 1000×600 мкм, $47,5 \times 27,5$ мкм, $21 \times 5,5$ мкм. На етапах активного навантаження найбільша різниця в величинах КІН між сітками 1000×600 мкм та $21 \times 5,5$ мкм становить $\approx 5\%$. Але на етапах розвантаження результати суттєво відрізняються - чим використовується більш густа сітка, тим більше відхиляється вправо графік КІН.

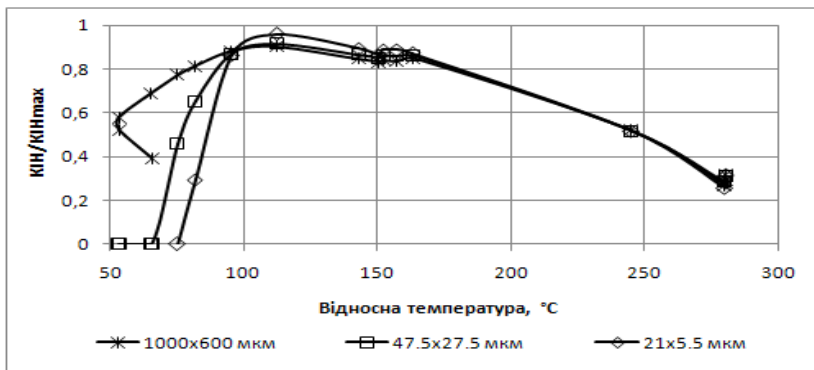


Рис. 10. Графіки відносних значень КІН, розрахованих на різних сітках

Розрахунок КІН вздовж фронту тріщини. На рис. 11 співставлені графіки розподілу відносних значень КІН вздовж фронту тріщини, які побудовані для сітки з кроком 600 мкм в площині, перпендикулярній до фронту тріщини та з рівномірним кроком вздовж фронту (без коефіцієнта згущення), і також для двох сіток з кроком 5,5 мкм у площині, перпендикулярній до фронту тріщини, одна з яких мала рівномірний крок вздовж фронту тріщини (величина кроку ≈ 1400 мкм), а інша згущувалась до глибокої точки та до кінця тріщини. Величини КІН, розраховані на сітці зі згущенням, виявились вищими за розрахованих на рівномірній сітці. Результати, отримані для сітки з дуже великою різницею в кроках (5,5 \times 1400 мкм) можна вважати неконсервативними, а такі сітки неприйнятними для використання.

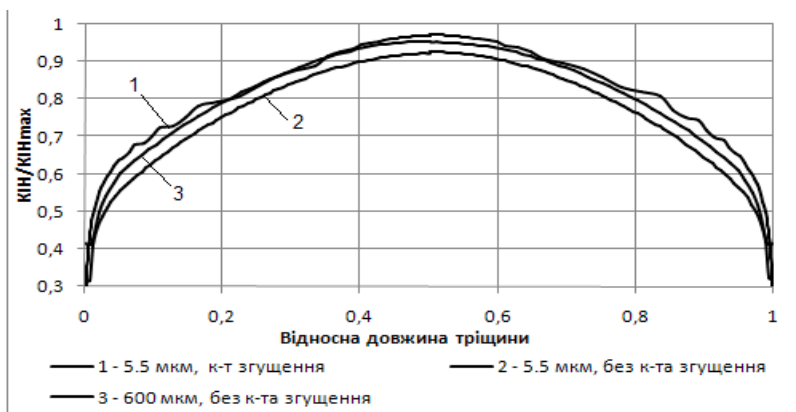


Рис. 11. Графіки розподілу відносних значень КІН вздовж фронту тріщини

Висновки.

1. Для характерного режиму аварійного охолодження корпусу реактора ВВЕР-1000 проаналізовані способи визначення коефіцієнтів інтенсивності навантажень, які ґрунтуються на використанні концепції J -інтеграла.

2. При розв'язанні задачі в пружній постановці та в пружнопластичній постановці без урахування історії навантаження різниця в значеннях КІН несуттєва незалежно від того, який контур інтегрування обирається.

3. Результати обчислення КІН, отримані при використанні вихідної повної моделі КР з вбудованою та без вбудованої тріщини, практично співпадають, що свідчить про недоречність вбудовування тріщини до вхідної повної моделі КР, однак, згідно з вимогами МАГАТЕ, тріщина має бути вбудована у фрагмент КР, який розглядається.

4. При використанні концепції J -інтеграла в 3D постановці у якості отвору навколо фронту тріщини потрібно вибирати шар елементів, які є безпосередньо суміжними з фронтом тріщини.

5. При використанні концепції J -інтеграла в 3D постановці розрахунок щільності енергії деформації інтегруванням по трапеції призводить до отримання менш консервативних результатів у порівнянні з розрахунком інтегрування за трикутником.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. МТ-Д.0.03.391-09. Методика оценки прочности и ресурса корпусов реакторов ВВЭР в процессе эксплуатации. – Киев, 2009. – 50 с.
2. РД ЭО 0606-2005. Методика расчёта на сопротивление хрупкому разрушению корпусов реакторов АЭС с ВВЭР (МРКР – СХР – 2004). – СПб.; М., 2004. – 65 с.
3. Чирков А.Ю. Смешанная схема метода конечных элементов для решения краевых задач теории упругости и малых упругопластических деформаций. – К.: Изд-во Ин-та пробл. прочности, 2003. – 250 с.
4. Кобельський С.В. Чисельний аналіз просторових задач теорії тріщин на основі змішаної схеми метода скінчених елементів. - Опір матеріалів і теорія споруд: Науково-технічний збірник. – Вип. 88. – К.: КНУБА, 2011. – С. 147-156.
5. Кобельський С.В. Аналіз змішаних скінчених елементів стосовно задач пружнопластичного деформування та механіки руйнування. - Опір матеріалів і теорія споруд: Науково-технічний збірник. – Вип. 89. – К.: КНУБА, 2012. – с.131-142.
6. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974.– 640 с.
7. deLorenzi H.G. On the energy release rate and the J-integral for 3-D crack configurations. – Int. Journ. of Fracture 19 (1982). – P.182-193.
8. Вычислительные методы в механике разрушения / Под ред. С. Атлури. – М.: Мир, 1990. – 392 с.

Стаття надійшла до редакції 19.06.2013 р.

Кобельский С.В.

**ПРИМЕНЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ J -ИНТЕГРАЛА К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЕЛИЧИН
КОЭФФИЦИЕНТОВ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ КОРПУСА
РЕАКТОРА ВВЭР-1000 ПРИ АВАРИЙНОМ ОХЛАЖДЕНИИ**

Для характерного режима аварийного охлаждения корпуса реактора ВВЭР-1000 проанализированы результаты определения коэффициентов интенсивности напряжений с использованием концепции J -интеграла на сетках конечных элементов различной густоты.

Kobelsky S.V.

**APPLICATION OF THE J -INTEGRAL CONCEPTION TO EVALUATION OF STRESS
INTENSITY FACTORS FOR THE WWER-1000 RPV UNDER SIMULATED
EMERGENCY COOLING REGIME**

Results of numerical evaluation of stress intensity factors using the J -integral conception are being analyzed for the finite element meshes of various densities.