

УДК 539.3

## ВИЗНАЧЕННЯ ТРИЩИНОСТІЙКОСТІ ЗАХИСНОЇ ОБОЛОНКИ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРУ ПРИ ТЕРМОСИЛОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ

С.О. Пискунов,  
д-р техн. наук

О.О. Шкриль,<sup>1</sup>  
д-р. техн. наук

<sup>1</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ  
Повітрофлотський просп., 31, м. Київ. 03680

Проведена оцінка напружено-деформованого стану захисної оболонки реактора з початковою тріщиною при дії термосилового навантаження. Отримані вздовж фронту тріщини значення коефіцієнтів інтенсивності напружень порівнюються з результатами розрахунку на дію окремо силового (внутрішнього тиску) і температурного навантаження.

**Ключові слова:** метод скінченних елементів (МСЕ), коефіцієнт інтенсивності напружень, захисна оболонка ядерного реактора, термосилове навантаження.

**Вступ.** Оцінка несучої здатності просторових тіл з тріщинами потребує обчислення параметрів механіки руйнування. При лінійному деформуванні найбільш розповсюджуваним параметром є коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН). Розв'язання таких задач виконується переважно чисельними методами, серед яких найбільшого поширення здобув метод скінченних елементів (МСЕ). На сьогоднішній день важливого значення становить питання визначення можливого терміну експлуатації об'єктів атомної енергетики, зокрема захисних оболонок реакторів, які являють собою просторові тіла складної форми. Під час експлуатації вони можуть зазнавати різких змін температурного режиму, що, при наявності в них початкових тріщин, може призводити до аварійних ситуацій. Тому питання оцінки напружено-деформованого стану оболонки реактора з початковою тріщиною в умовах термосилового навантаження є актуальною проблемою будівельної механіки.

**Методи визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень при термосиловому навантаженні.** Енергетичний метод передбачає визначення КІН на основі величин інтеграла Черепанова – Райса [2, 6].

$$J = \int_S \left( W n_t - \sigma^{ij} \frac{\partial u}{\partial x} n_j \right) dS.$$

При наявності нерівномірного температурного поля, вираз інваріантного інтегралу набуває наступного вигляду [6]:

$$J^* = J + \int_S \alpha \sigma_{ij} \delta_{ij} \frac{\partial T}{\partial x} dS, \quad (1)$$

Проведені дослідження показали, що ефективним варіантом обчислення  $J^*$  в дискретних моделях МСЕ є метод реакцій [1, 3, 5]. Формула (1) згідно методу реакцій представлена в термінах вузлових переміщень ( $\{u\}_I$ ,  $\{u\}_{II}$ )

та вузлових реакцій ( $\{R\}_I$ ,  $\{R\}_{II}$ ) першого та другого станів тіла з тріщиною (рис. 1):

$$J^* = \frac{1}{2\Delta z^2} \left( \{u\}_I^T \{R\}_{II} - \{u\}_{II}^T \{R\}_I \right). \quad (2)$$

Зв'язок КІН з величиною  $J$  за умов лінійного деформування визначається за формулою [2, 6]:

$$J = kK_I^2/E, \quad (3)$$

де  $k=1$  за умов плоского напруженого стану і  $k=1-\nu^2$  для плоскої деформації,  $E$  – модуль Юнга.

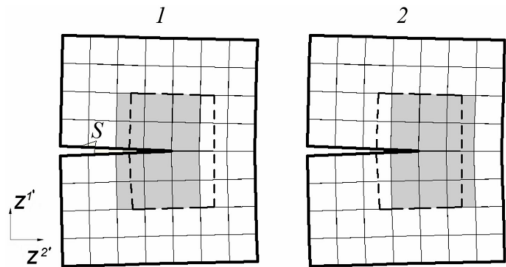


Рис. 1. Підобласті інтегрування двох станів

Прямий метод передбачає використання співвідношень, що пов'язують напруження і переміщення з КІН. Для тріщин нормального відриву (рис.2) вирази, що пов'язують напруження з КІН мають наступний вигляд [2, 6]:

$$\begin{aligned} \sigma^{11} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right); & \sigma^{12} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}; \\ \sigma^{22} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

де  $r, \theta$  – полярні координати точки визначення КІН (рис. 2).

При постійній температурі  $T$  в околі вершини тріщини зв'язок між переміщеннями і  $K_I$  описується формулою [2,6]:

$$\begin{aligned} u_i &= \frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cdot F_i(\theta) + \alpha' \cdot k \cdot T y^{i''}, \\ F_1(\theta) &= \sin \frac{\theta}{2} \left( k + 1 - 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right), \\ F_2(\theta) &= \cos \frac{\theta}{2} \left( k - 1 + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right), \end{aligned}$$

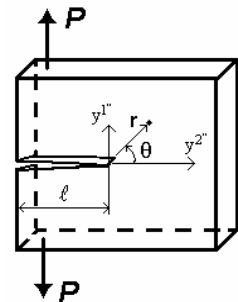


Рис. 2. Тріщина нормального відриву

де  $G$  – модуль зсуву;  $\nu$  - коефіцієнт Пуасона;  $\alpha' = \alpha$  – коефіцієнт лінійного розширення у випадку плоского напруженого стану,  $\alpha' = \alpha(1+\nu)$  для плоскої деформації,  $k=3-4\nu$  для плоскої деформації,  $k=(3-\nu)/(1+\nu)$  для плоского напруженого стану. Реалізація методики визначення КІН прямим методом в дискретних моделях МСЕ описана в [3-5].

**Розрахунок захисної оболонки реактора.** Ядерний реактор «ВВЕР-1000» застосовується на Запорізькій та Рівненській АЕС. Аварійне охолодження корпусу з робочого стану під внутрішнім тиском інтенсивності  $q=17,5$  МПа здійснюється по внутрішній поверхні вздовж дуги з кутом розчину  $12^\circ$  нижче осі патрубку при конвективному

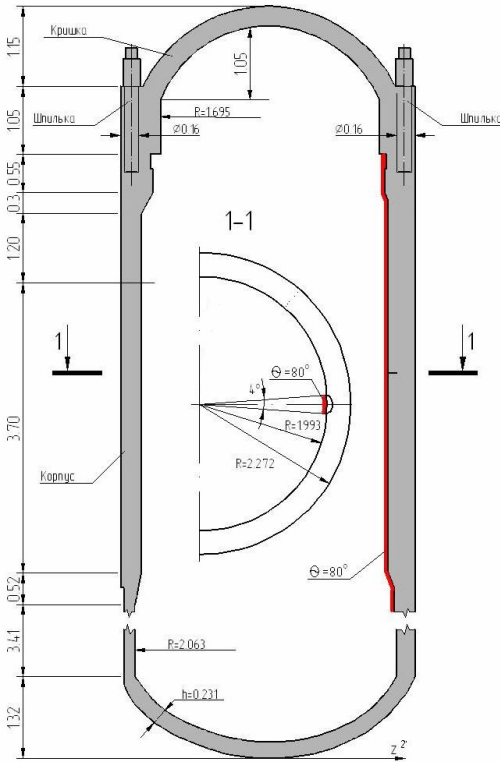


Рис. 3. Схема корпусу реактора з тріщиною

теплообміні зі струменем рідини з температурою  $Q_1 = 80^\circ C$  (рис. 3). На іншій частині внутрішньої поверхні відбувається взаємодія з повітрям, температура якого є сталою і становить  $Q_2 = 300^\circ C$ . Зовнішня поверхня корпусу теплоізолювана.

Згідно з вимогами МАГАТЕ в корпусах ядерних реакторів рекомендовано розглядати тріщини глибиною не більш ніж чверть товщини корпусу, напівеліптичного вигляду із співвідношенням осей еліпсу в діапазоні від 0,3-0,7. В даній роботі розглядалися напівеліптичні тріщини глибиною 48 мм із співвідношенням осей еліпса 0,33 та 0,67, що розташовані в середній частині стінки корпусу реактора (рис. 3). Розрахункові схеми фрагменту

корпусу реактора з тріщинами розроблено із врахуванням симетрії об'єкту та навантаження (рис. 4). Розміри фрагмента прийняті таким чином, щоб відстань від фронту тріщини до його краю була не меншою ніж потрійний розмір тріщини в цьому напрямку. Дискретні моделі МСЕ фрагменту стінки корпусу реактора із двома типами тріщин показані на рис. 5.

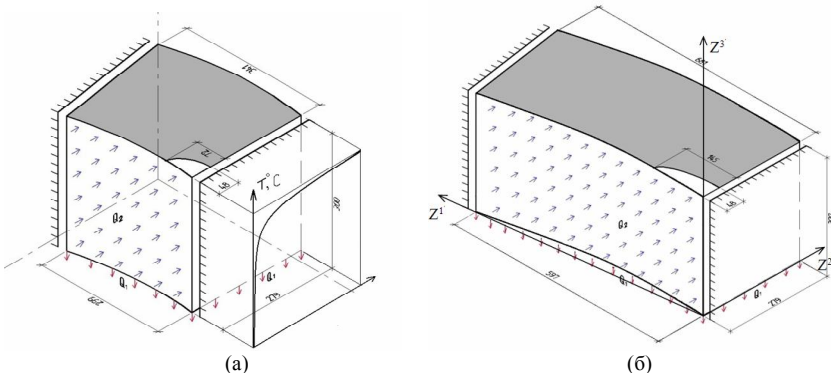


Рис. 4. Розрахункові схеми для напівеліптичних тріщин із співвідношенням осей еліпса 0,67 (а) та 0,33 (б)

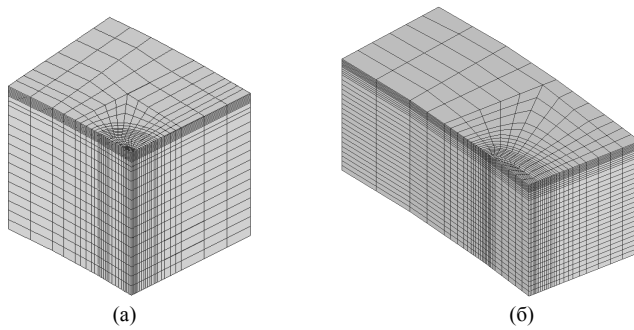


Рис. 5. Дискретна модель МСЕ для напівеліптичних тріщин із співвідношенням осей еліпса 0,67(а) та 0,33(б)

Результати розрахунку показують, що при врахуванні температурного навантаження значення переміщень та напружень значно збільшуються, та набувають нерівномірного характеру (рис. 6, 7).

Для тріщини  $a/c = 0.67$  графіки розподілу переміщень та напружень мають аналогічний характер. Зростання переміщень та напружень призводить до збільшення отримуваних величин КІН (рис. 8, 9).

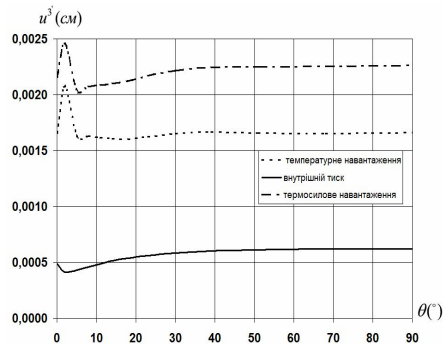


Рис. 6. Розподіл переміщень вздовж фронту тріщини  $a/c = 0.33$

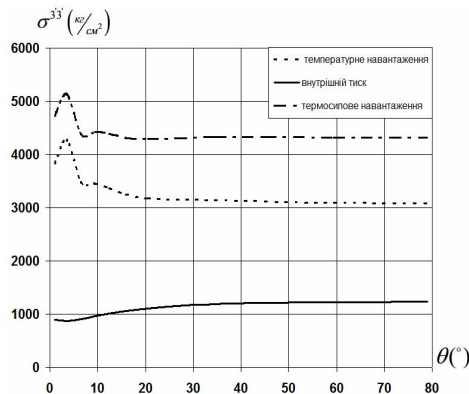
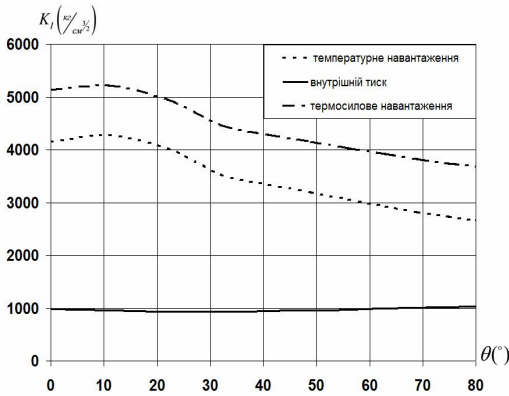
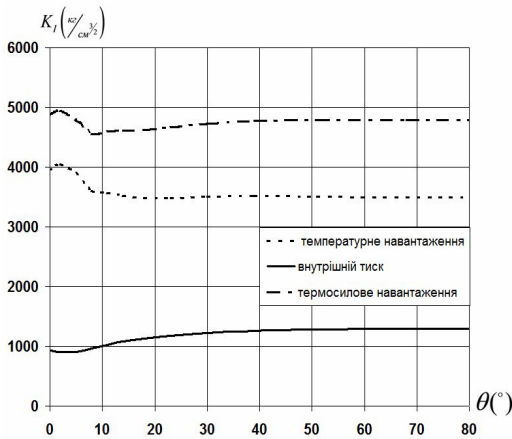


Рис. 7. Розподіл напружень ( $\sigma$ ) вздовж фронту тріщини  $a/c = 0.33$

Рис. 8. Розподіл КІН вздовж фронту тріщини  $a/c = 0.67$ Рис. 9. Розподіл КІН вздовж фронту тріщини  $a/c = 0.33$ 

Наведені розподіли КІН вздовж фронту, показують що більшу небезпеку становить тріщина  $a/c = 0.33$ . Процес аварійного охолодження призводить до значного зростання значень КІН і нерівномірності їх розподілення вздовж фронту. Таким чином наявність температурних складових навантаження має бути врахована при визначенні несучої здатності корпусу реактора.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Bazhenov V.A., Pyskunov S.O., Shkryl' O.O. A methodology of determining of parameter  $J^*$  in discrete models of finite element method* // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2017. – Вип. 99. – С. 33-44
2. *Броек Д. Основы механики разрушения: Пер. с англ.* – М.: Высш. шк., 1980. – 368 с.
3. *Напіваналітичний метод скінчених елементів у задачах руйнування тіл з тріщинами* / [Баженов В. А., Пискунов С. О., Шкріль О. О.] – Київ: Вид-во “Каравела”, 2017. – 208 с.
4. *Пискунов С.О. Шкріль О.О., Мицюк С.В. Прямий метод визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень в призматичних та просторових незамкнених тілах обертання при статичному навантаженні* // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2016. – Вип. 97. – С. 3-14.

5. Шкріль О.О. Визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень при температурному навантаженні/ О.О. Шкріль // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2013. – Вип. 93. – С. 128-136.
6. Anderson T.L. Fracture mechanics: Fundamentals and Applications, Third Edition. - CRC Press, 2005. - 640p.

## REFERENCES

1. Bazhenov V.A., Pyskunov S.O., Shkryl' O.O. Metodologiya opredeleniya parametra  $J^*$  v diskretnykh modelyakh metoda konechnykh elementov (A Methodology of Determining of Parameter  $J^*$  in Discrete Models of Finite Element Method) // Opir materialiv i teoriya sporud. - 2017. - Vip. 99. - S. 33-44.
2. Brojek D. Osnovy mekhaniki razrusheniya (Fundamentals of Fracture Mechanics): Per. s angl. - M.: Vyssh. shk., 1980. - 368 s.
3. Napivaniľtichnyi metod skinchenikh yelementiv u zadachi ruynuvannya til z trishchinami (Semi-analytical Finite Element Method in Problems of Fracture of Bodies with Cracks) / [Bazhenov V. A., Piskunov S. O., Shkryl' O. O.] - Kii: Vid-vo "Karavela", 2017. - 208 s.
4. Piskunov S.O. Shkryl' O.O., Mitsyuk S.V. Pryamiy metod viznachennya koyefitsientiv intensivnosti napruzhen' v prizmatichnikh ta prostorovykh nezamknenikh tilakh obertannya pri staticheskom navantazheni (A Direct Method for Determining of Stress Intensity Factors in Prismatic and Spatial Non-closed Circular Bodies under Static Loading) // Opir materialiv i teoriya sporud. - 2016. - Vip. 97. - S. 3-14
5. Shkryl' O.O. Viznachennya koyefitsientiv intensivnosti napruzhen' pri temperaturnomu navantazheni (Determining of Stress Intensity Factors under Temperature Load) / O.O. Shkryl' // Opir materialiv i teoriya sporud. - 2013. - Vip. 93. - S. 128-136
6. Anderson T.L. Fracture mechanics: Fundamentals and Applications, Third Edition. - CRC Press, 2005. - 640p.

Стаття надійшла 14.11.2018

*Piskunov S.O., Shkryl' A.A.*

#### **DETERMINATION OF THE CRACK RESISTANCE OF THE REACTOR PROTECTIVE SHELL UNDER THERMAL FORCE LOAD**

The determination of the crack resistance of the protective shell of a nuclear reactor under thermal forced load has been made in the article. The reactor design under consideration is used on several NPPs in Ukraine. The case of the presence of an initial semi-elliptic cracks in the reactor's protective shell is considered. The thermal forced load is comprised of internal pressure and temperature load during emergency cooling. In order to assess the crack resistance of the reactor, in accordance with the recommendations of the IAEA, the stress intensity factor (SIF) is used. To substantiate the reliability, the definition of the CIF is carried out by energy and direct methods. The CIF determination by the energy method is performed on the basis of the calculation of the invariant integral  $J^*$ . The CIF determination by a direct method is based on a known distribution of displacements and stresses in the vicinity of the crack top. The solution of the problem is accomplished by finite element method (FEM). For the calculation of invariant  $J^*$  integrals in FEM discrete models, a reaction method is used which showed high efficiency for a wide range of problems. Definition of the CIF by a direct method is carried out in the special neighborhood of crack top. When solving the problem, a discrete model of a fragment of a reactor with a semi-elliptic crack with a relation to the elliptic semiaxes of 0.67 and 0.33 is considered. The configuration and size of the crack are taken in accordance with the existing IAEA recommendations for reactors. The graphs of the distribution of stresses, displacements and CIF along the front of the semi-elliptic crack are presented. CIF acquires its the highest values at the point most remote from the inner surface of the reactor's protective shell. It is shown that taking into account temperature loads significantly increases the value of CIF compared with the calculation only from the effect of internal pressure. It was found that a crack with a half-bonded ellipse of 0.33 is more dangerous than 0.67.

**Keywords:** finite element method, stress intensity factor, protective shell of a nuclear reactor, thermal load.

Пискунов С.О., Шкрыль А.А.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ РЕАКТОРА ПРИ ТЕРМОСИЛОВОЙ НАГРУЗКЕ

Проведена оцінка напружено-деформованого стану захисної оболонки реактора с початкової тріщиною при дії термосилової навантажки. Отримані вздовж фронту тріщини значення коефіцієнтів інтенсивності напружень порівнюються з результатами розрахунку на дію окремо силового (внутрішнього тиску) і температурного навантаження.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, коэффициент интенсивности напряжений, защитная оболочка ядерного реактора, термосиловая нагрузка.

УДК 539.3

*Пискунов С.О., Шкрыль О.О. Визначення тріщиностійкості захисної оболонки ядерного реактору при термосиловому навантаженні // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2018. – Вип. 101. – С. 60-66.*

*Проведена оцінка напружено-деформованого стану захисної оболонки реактора з початковою тріщиною при дії термосилового навантаження. Отримані вздовж фронту тріщини значення коефіцієнтів інтенсивності напружень порівнюються з результатами розрахунку на дію окремо силового (внутрішнього тиску) і температурного навантаження. Ил. 9. Бібліогр. 6 назв.*

UDC 539.3

*Piskunov S.O., Shkriil' A.A. Determination of the crack resistance of the reactor protective shell under thermal force load // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-&-Technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2018. – Issue 101. – P. 60-66. – Ukr.*

*An assessment of the stress-strain state of the reactor protective shell with an initial crack under the action of a thermal force load is carried out. The values of the stress intensity factors obtained along the crack front are compared with the results of the calculation for the effect of a separate force (internal pressure) and temperature effect.*

Fig. 9. Ref. 6.

УДК 539.3

*Пискунов С.О., Шкрыль А.А. Определение трещиностойкости защитной оболочки реактора при термосиловой нагрузке // Сопротивление материалов и теория сооружений: науч.-тех. сборн. – К.: КНУСА, 2018. – Вип. 101. – С. 60-66. – Укр.*

*Проведена оцінка напружено-деформованого стану захисної оболонки реактора с початкової тріщиною при дії термосилової навантажки. Отримані вздовж фронту тріщини значення коефіцієнтів інтенсивності напружень порівнюються з результатами розрахунку на дію окремо силового (внутрішнього тиску) і температурного навантаження. Ил. 9. Бібліогр. 6 назв.*

Ил. 9. Бібліогр. 6 назв.

**Автор (вчена ступень, вчене звання, посада):** доктор технічних наук, професор Пискунов Сергій Олегович.

**Адреса домашня:** 03087, Україна, м. Київ, вул. Іскрівська б.3, кв.10

**Мобільний тел.:** +38(050) 962-66-14.

**E-mail:** [s\\_piskunov@ua.fm](mailto:s_piskunov@ua.fm)

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0003-3987-0583>

**Автор (вчена ступень, вчене звання, посада):** доцент, доктор технічних наук, професор кафедри будівельної механіки КНУБА Шкрыль Олексій Олександрович.

**Адреса робоча:** 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра будівельної механіки.

**Адреса домашня:** 08132, Україна, м. Вишневе, вул. Г. Сковороди 10, кв. 24

**Мобільний тел.:** +38(050) 307-61-49.

**E-mail:** [alexniism@ukr.net](mailto:alexniism@ukr.net)

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0003-0851-4754>