

УДК 621.039.4:62-78

М.Є. Пахалович<sup>1</sup>, Г.С. Кіпоренко<sup>2</sup><sup>1</sup> ТОВ «Експертно-технічний центр «ЕНЕРГОРЕСУРС», Київ<sup>2</sup> Українська інженерно педагогічна академія, Харків

## ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ОПОРУ КРИХКОМУ РУЙНУВАННЮ ТРУБОПРОВІДІВ ПІВДЕННО-УКРАЇНСЬКОЇ АЕС

У статті розглядається вдосконалення методики розрахунку оцінки опору крихкому руйнуванню ділянок найбільш навантажених зон трубопроводів реакторного відділення ЮУ АЕС відповідно до нормативно-методичного забезпечення по експлуатаційній безпеці. Наводяться результати розрахунку коефіцієнтів інтенсивності напружень для поздовжньої і поперечної постульованої тріщин для різних режимів.

**Ключові слова:** крихке руйнування, трубопровід, інтенсивність напруги, безпека експлуатації.

### Вступ

Атомна електростанція задовольняє умовам безпеки, якщо її радіаційний вплив на персонал, населення і навколишнє середовище при нормальній експлуатації, порушеннях нормальної експлуатації і проектних аваріях не призводить до перевищення встановленої дози опромінення персоналу та населення. Згідно [1], основним документом, який визначає безпечну експлуатацію енергоблоку, є технологічний регламент безпечної експлуатації, в якому встановлюються межі та умови безпечної експлуатації енергоблоку, а також вимоги і основні прийоми безпечної експлуатації енергоблоку, і загальний порядок виконання операцій, пов'язаних з безпекою АЕС. Оцінка технічного стану та залишкового ресурсу трубопроводів здійснюється в рамках робіт з контролю, оцінки, прогнозування та управління ресурсними характеристиками елементів енергоблоку АС і продовження терміну експлуатації блоку АС в цілому [2].

**Мета роботи.** Метою розрахунку є оцінка опору крихкому руйнуванню ділянок найбільш навантажених зон головного циркуляційного трубопроводу (ГЦТ), головної запірної засувки (ГЗЗ) і трубопроводу зв'язку компенсатор об'єму (КО) з «гарячої» ниткою петлі головного циркуляційного контуру (ГЦК) реакторного цеху енергоблоку ВП «ПУ АЕС» відповідно до нормативно-методичного забезпечення з експлуатаційної безпеки трубопроводів [3].

Методика визначення ресурсу трубопровідних систем включає наступні етапи проведення робіт:

- оцінка технічного стану трубопроводів по визначальним параметрам;
- оцінка залишкового ресурсу трубопроводів за результатами вимірювання та / або визначення параметрів граничного стану трубопроводів.

В основу прийнятих в Нормам [4] методів розрахунку покладено принципи оцінки за такими граничними станами:

- 1) короткочасне руйнування (в'язке і крихке);

- 2) руйнування в умовах повзучості при статичному навантаженні;

- 3) пластична деформація по всьому перетину деталі;

- 4) накопичення гранично допустимої деформації повзучості;

- 5) циклічне накопичення пластичної деформації, що призводить до неприпустимого змуну розмірів або квазістатичного руйнування;

- 6) виникнення макротріщин при циклічному навантаженні;

- 7) втрата стійкості.

### Виклад основного матеріалу

Основними розрахунковими навантаженнями є: внутрішній або зовнішній тиск, маса виробу і додаткові навантаження (маса приєднаних виробів, ізоляції трубопроводів і т.п.), зусилля від реакції опор і приєднаних трубопроводів, температурні впливи, вібраційні навантаження. Нормами не регламентуються методи, що застосовуються для визначення розрахункових навантажень, внутрішніх зусиль, переміщень, напруг і деформацій елементів, що розраховуються. Обраний метод повинен враховувати всі розрахункові навантаження для всіх розрахункових випадків і давати можливість визначити всі необхідні розрахункові групи категорій напружень.

Але, основною проблемою забезпечення безпеки і ресурсу обладнання АЕС залишаються питання динаміки і міцності. Виходячи з основного завдання розрахунку залишкового ресурсу та продовження строків експлуатації трубопровідних систем енергетичних установок при динамічних впливах, необхідно провести оцінку опору крихкого руйнування при утворенні тріщини на поверхні металу.

Розрахунок на опір крихкому руйнуванню елементів ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі ГЦК проводився відповідно методики [4]. Попередньо проводився розрахунок напружено деформованого стану головного циркуля-

ційного трубопроводу для режиму нормальної експлуатації, порушення нормальних умов експлуатації, гідровипробувань та аварійної ситуації. Також необхідно визначити складові напружень розтягу  $\sigma_{\text{р}}$  і вигину  $\sigma_{\text{іq}}$ . Максимальні напруги для розглянутих режимів експлуатації отримані в результаті виконаного розрахунку на статичну міцність.

Елементи ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі ГЦК відносяться до I категорії сейсмостійкості що вимагає розрахунку і оцінки міцності при сейсмічних впливах.

Для виконання розрахунку на опір крихкому руйнуванню в разі відсутності дефектів, згідно з вимогами Норм [5], для кожної розрахункової ділянки моделювався постульований дефект у вигляді поздовжньої і поперечної поверхневої напівеліптичної тріщини з параметрами  $l/c=2/3$ .

Основними характеристиками матеріалів, що використовуються в розрахунку є критичний коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_{\text{IC}}$ , критична температура крихкості  $T_k$  і межа плинності  $R_{\text{p}0,2}^T$ .

Умова нерозповсюдження тріщини

$$K_{\text{IC}} < K_{\text{th}}, \quad (1)$$

де  $K_{\text{th}}$  – пороговий коефіцієнт інтенсивності напружень, який визначається з рівняння:

$$K_{\text{th}} = \sigma_{\text{th}} Y \sqrt{\pi \alpha}. \quad (2)$$

Умова міцності виконується, коли коефіцієнт інтенсивності менше критичного коефіцієнта інтенсивності напруги:

$$K_I < [K_I]_i, \quad (3)$$

де  $[K_I]_i$  – допустиме значення коефіцієнта інтенсивності напруги, МПа·м<sup>1/2</sup>.

Індекс  $i$  вказує, що допустимі значення коефіцієнтів інтенсивності напруги вибирають різними в залежності від розрахункових умов:  $i = 1$  – для нормальних умов експлуатації (НЕ);  $i = 2$  – для гідравлічних (пневматичних) випробувань (ГВ) і порушення нормальних умов експлуатації (ПНЕ);  $i = 3$  – для аварійної ситуації (АС).

Для обліку зміни властивостей матеріалу в процесі експлуатації визначення допустимого коефіцієнта інтенсивності напруги проводиться з урахуванням критичної температури крихкості. Для сталей перлітного класу і високохромистих сталей і їх зварних з'єднань з межею плинності при температурі 20°C не перевищує 600 МПа (60 кгс/мм<sup>2</sup>) використовується узагальнена залежність коефіцієнта інтенсивності напруги [5]:

$$[K_I]_1 = 13 + 18e^{0,02(T-T_k)}; \quad (4)$$

$$[K_I]_2 = 17 + 24e^{0,018(T-T_k)}; \quad (5)$$

$$[K_I]_3 = 26 + 36e^{0,02(T-T_k)}. \quad (6)$$

Критичну температуру крихкості матеріалу визначають за формулою:

$$T_k = T_{k0} + \Delta T_T + \Delta T_N + \Delta T_F, \quad (7)$$

де  $T_{k0}$  – критична температура крихкості матеріалу в початковому стані;

$\Delta T_T$  – зсув критичної температури крихкості внаслідок температурного старіння;

$\Delta T_N$  – зсув критичної температури крихкості внаслідок циклічної пошкоджуваності;

$\Delta T_F$  – зсув критичної температури крихкості внаслідок впливу нейтронного опромінення.

Розрахунок коефіцієнта напруги для еліптичної поверхневої тріщини (рис. 1) в точках А і В визначається за такими формулами:

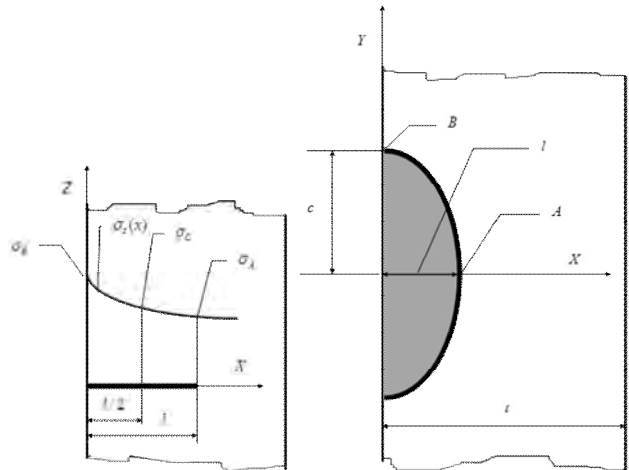


Рис. 1. Схема поверхневої напівеліптичної тріщини

$$K_{\text{IA}} = M_A N_A S_A \sqrt{\pi l/Q}; \quad (8)$$

$$K_{\text{IB}} = M_B N_B S_B \sqrt{\pi l/Q}; \quad (9)$$

$$Q = 1 + 1,464\alpha^{1,65}, \quad (10)$$

де  $N_A = \left[ 1 - (0,89 - 0,57\sqrt{\alpha})^3 \tau^{1,5} \right]^{-3,25}$ ,

$M_A = 1,12 - 0,08\alpha$  – параметр тріщини в точці А;

$N_B = (1 + 0,32\tau^2) N_A$ ;  $M_B = (1,23 - 0,09\alpha)\sqrt{\alpha}$  –

параметр тріщини в точці В;  $l$  – глибина тріщини, мм;  $c$  – ширина тріщини, мм;  $\alpha = l/c$  при  $l \leq c$ ;  $\tau = l/t$  при  $l > c$ .

У загальному випадку довільного розподілу напружень  $\sigma_z = \sigma_z(x)$  в стінці елемента, а також довільної форми їх завдання, глибина  $l$  напівеліптичної поверхневої тріщини також ділиться на  $2n$  ділянок. Кількість точок, в яких задаються напруги, складе:

$$K = 2n + 1. \quad (11)$$

При цьому координата  $x_k$  кожної точки визначається з виразу:

$$x_k = ((k-1)/(2n)) \cdot l, \quad \text{де } k = 1, \dots, 2n+1. \quad (12)$$

Напруги, які задані попередньо в довільній формі, визначаються для кожної точки  $x_k$ :

$$\sigma_k = \sigma_z(x = x_k). \quad (13)$$

Значення напруги для точок визначаються за формулами:

$$\sigma_A = \sum_{k=1}^K (B_{k,3} + \alpha B_{k,4} + \lambda B_{k,5}) \sigma_k ; \quad (14)$$

$$\sigma_B = \sum_{k=1}^K B_{k,6} \sigma_k ; \quad (15)$$

$$\lambda = \tau(1 - 1.9 \cdot \alpha^{0.75} + 0.9 \cdot \alpha^{1.5}), \quad (16)$$

де  $B_{k,3}$ ,  $B_{k,4}$ ,  $B_{k,5}$  та  $B_{k,6}$  для  $k$ -ї точки ( $k=10$ ) визначаються з табл. 1.

Таблиця 1

Коефіцієнти для розрахунку напруги тріщини

k	$B_{k,3}$	$B_{k,4}$	$B_{k,5}$	$B_{k,6}$
1	0,0189	-0,0085	0,0278	0,2700
2	0,0378	-0,0165	0,0548	0,1980
3	0,0370	-0,0160	0,0510	0,1120
4	0,0368	-0,0155	0,0472	0,0800
5	0,0367	-0,0149	0,0431	0,0620
6	0,0366	-0,0142	0,0390	0,0500
7	0,0367	-0,0134	0,0347	0,0410
8	0,0368	-0,0125	0,0303	0,0350
9	0,0371	-0,0115	0,0257	0,0290
10	0,0376	-0,0105	0,0207	0,0250

Для поверхні елемента, що має кривизну в напрямку осі Z, коефіцієнти інтенсивності напружень визначається по відношенню (поздовжня тріщина; радіус кривизни в напрямку осі Z,  $R_z = R$ , рис. 2, а):

$$K_{IA}^1 = \frac{1 + 4 \frac{1}{R_z} (1 - \sqrt{\alpha})}{1 + 5 \frac{1}{R_z} (1 - \sqrt{\alpha}) (1 + 2\tau^2)} K_{IA}, \quad K_{IB}^1 = K_{IB} \cdot (17)$$

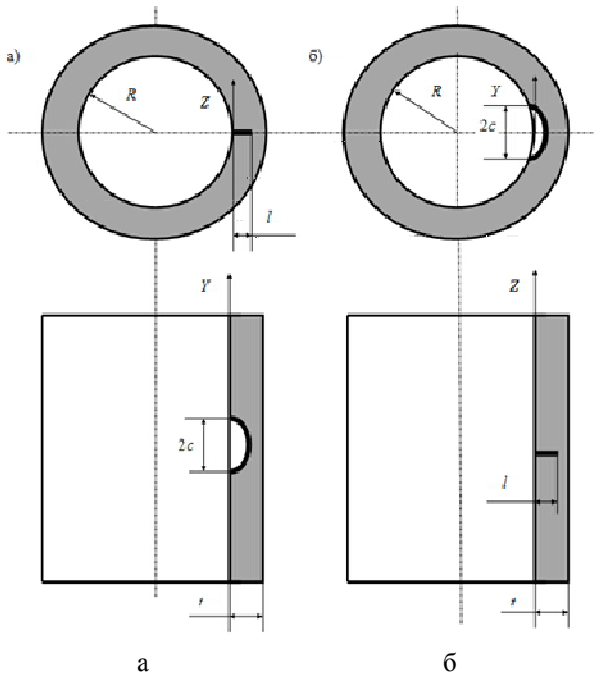


Рис. 2. Схема елемента з тріщиною на поверхні з кривизною: а – уздовж осі Z; б – уздовж осі Y

За запропонованою методикою виконано розрахунок на опір крихкому руйнуванню елементів ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ніткою петлі ГЦК.

Результати визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень для поздовжньої осі Y і поперечної осі Z постульованої тріщини для режимів НЕ, ПНЕ і ГВ наведені на діаграмах рис. 3 – 6.

Як бачимо з наведених діаграм величина коефіцієнтів інтенсивності напружень для розглянутих режимів експлуатації на три порядки менше допустимих коефіцієнтів інтенсивності напружень що задовольняє умовам експлуатації.

На рис. 3 – 6 позначено:

- 1♦ розрахункова глибина тріщини;
- 2♦, 3♦ коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_A$  уздовж осі Y в точці А;
- 4♦, 5♦ коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_B$  уздовж осі Z в точці В.

При цьому допустимий коефіцієнтів інтенсивності напружень  $[K_I]_1 < 65000 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$

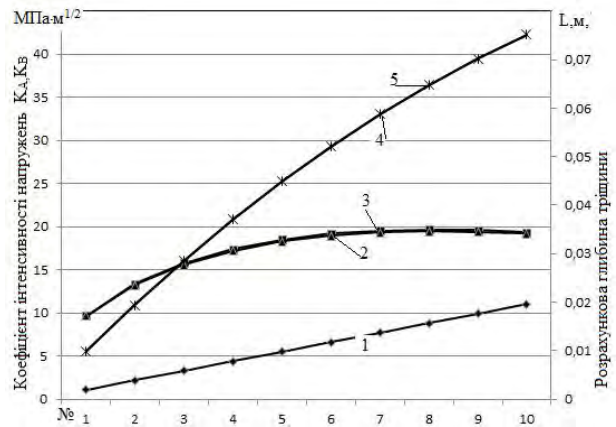


Рис. 3. Діаграма залежності коефіцієнтів інтенсивності напружень ГЦТ від корпусу реактора (КР) до парогенератора (ПГ) за нормальних умов експлуатації

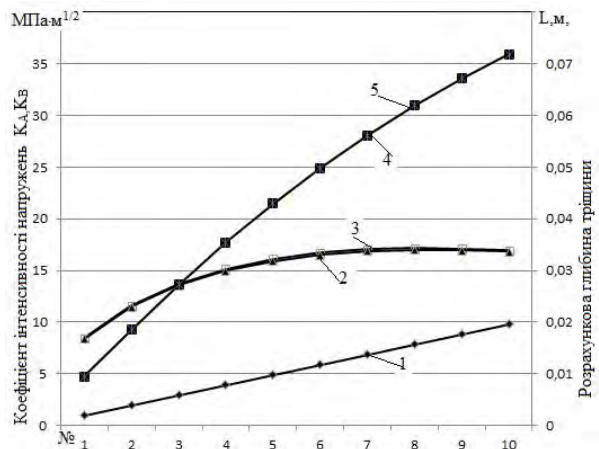


Рис. 4. Діаграма залежності коефіцієнтів інтенсивності напружень ГЦТ від ПГ до ГЦН за нормальних умов експлуатації

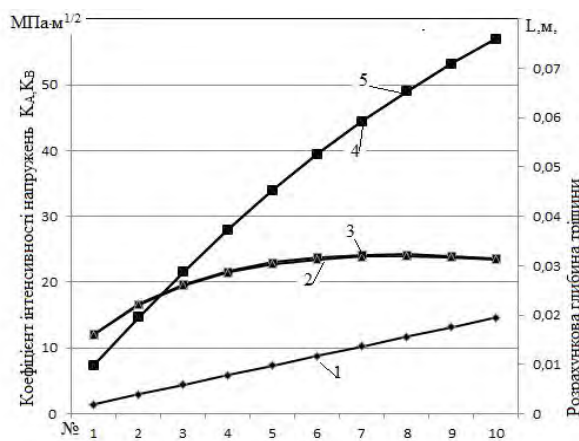


Рис. 5. Діаграма залежності коефіцієнтів інтенсивності напружень ГЦТ від КР до ПГ при порушенні нормальних умов експлуатації

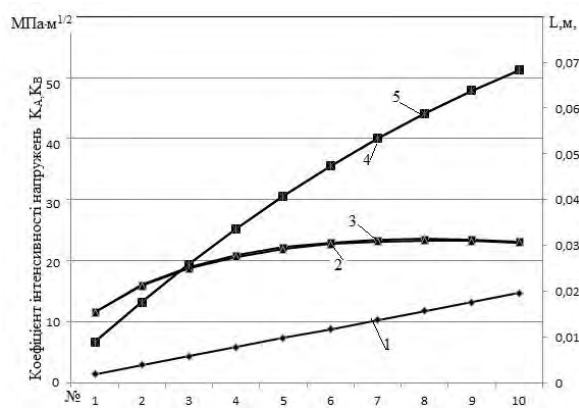


Рис. 6. Діаграма залежності коефіцієнтів інтенсивності напружень ГЦТ від ПГ до ГЦН при порушенні нормальних умов експлуатації

### Висновок

Опір крихкому руйнуванню вважається забезпеченим (а дефект вважається стабільним), якщо для обраного розрахункового дефекту у вигляді тріщини в розглянутому режимі експлуатації виконується умова (3).

### УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ ТРУБОПРОВОДОВ ЮЖНО-УКРАИНСКОЙ АЭС

Н.Е. Пахалович, А.С. Кипоренко

В статье рассматривается усовершенствование методики расчета оценки сопротивления хрупкому разрушению участков наиболее нагруженных зон трубопроводов реакторного отделения Южноукраинской АЭС в соответствии с нормативно-методическим обеспечением по эксплуатационной безопасности. Приводятся результаты расчета коэффициентов интенсивности напряжений для продольной и поперечной постулированной трещины для различных режимов.

**Ключевые слова:** хрупкое разрушение, трубопровод, интенсивность напряжения, безопасность эксплуатации.

### IMPROVEMENT OF METHOD OF CALCULATION RESISTANCE TO BRITTLE FRACTURE PIPELINES SOUTH UKRAINIAN NPP

N.E. Pahalovich, A.S. Kiporenko

The article deals with the improvement of methods for calculating the resistance to brittle fracture evaluation areas most loaded zones pipeline reactor compartment South Ukrainian NPP in accordance with the regulatory and methodological support for operational safety. The results of the calculation of the stress intensity factors for the longitudinal and transverse cracks postulated for different modes

**Keywords:** brittle fracture, pipeline, power intensity, operational safety.

Результати розрахунку на крихку міцність за наведеною вище методикою представлені на діаграмах 3 – 6. Діаграми містять значення коефіцієнта інтенсивності напружень для точок А і В для поздовжньої і поперечної тріщини, а також значення допустимого коефіцієнта інтенсивності напруги.

В результаті оцінки результатів виконаного розрахунку на опір крихкому руйнуванню можна зробити висновок про виконання умови крихкої міцності для всіх розглянутих розрахункових зон і режимів експлуатації, як за станом на ППР-2011, так і за станом на ППР-2035.

У зв'язку з тим, що під час проведення обстежень ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі ГЦК дефектів не виявлено, при виконанні перевірконого розрахунку на опір крихкому руйнуванню як розрахунковий дефекту прийнята поверхнева напівеліптична тріщина глибиною  $l = 0,25s$  з співвідношенням  $l / c = 2/3$ .

### Список літератури

1. НП 306.2.141-2008. Норми та правила ядерної та радіаційної безпеки.
2. НП 306.2.099-2004. Общие требования к продолжению эксплуатации энергоблоков АЭС в сверхпроектный срок по результатам осуществления периодической переоценки безопасности.
3. Кіпоренко Г.С. Удосконалення нормативного забезпечення експлуатаційної безпеки трубопровідних систем атомних електростанцій: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Кіпоренко Г.С. – Х., 2010. – 20 с.
4. Методика М-02-91. Определение допускаемых дефектов в металле оборудования и трубопроводов во время эксплуатации АЭС.
5. ПНАЭ Г-7-002-86 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок / Госатомэнергонadzор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 524 с.

Надійшла до редколегії 6.04.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.П. Тарасюк, Українська інженерно-педагогічна академія, Харків.