

УДК 620.197.5:669.788

## КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ НАВОДНЮВАННЯ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ ТРУБ

WEI MING<sup>1</sup>, О. Я. ЧЕПІЛЬ<sup>2</sup>, Н. Т. ГЕМБАРА<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Wuhan Fiberhome Technical Services Co., Ltd., Wuhan, China;

<sup>2</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Побудовано математичну модель для оцінювання впливу наводнювання і корозійного розтріскування на довговічність конструктивних елементів. За використання розроблених комп'ютерних програм відтворено наводнення і деформування елементів конструкцій. Визначено довговічність прямолінійної ділянки теплообмінних труб парогенераторів атомних електростанцій за експлуатаційних умов.

**Ключові слова:** *корозивне середовище, повзучість, енергія деформування, пошкодження, довговічність, водневмісне середовище.*

A mathematical model has been built to assess the effect of hydrogen saturation and stress corrosion cracking on the durability of structural elements. Using the developed computer programs, the process of hydrogenation and deformation of structural elements is reproduced. The indicators of the durability of a straight section of heat exchange tubes of steam generators of nuclear power plants for operating conditions have been determined.

**Keywords:** *corrosive environment, creep, deformation energy, damage, durability, hydrogen-containing medium.*

**Вступ.** Теплові та ядерні енергоустановки широко використовують в енергетичних, транспортних, технологічних та інших технічних системах. Створювати та експлуатувати теплове та ядерне енергообладнання неможливо без обґрунтування працездатності їх елементів [1–3]. Похибки обґрунтування працездатності елементів створюють ризики важких аварій. Таким чином, для забезпечення ефективної безпечної експлуатації теплових і ядерних енергоустановок необхідно постійно вдосконалювати підходи до обґрунтування працездатності їх елементів.

Відповідальними елементами теплових і ядерних енергоустановок є теплообмінні труби, які навантажені внутрішнім тиском і експлуатуються у важких умовах, що спричиняє інтенсивну суцільну корозію конструкційних матеріалів. Умови експлуатації теплообмінних труб парогенераторів атомних електростанцій характеризуються появою повзучості, викликаною високими механічними напруженнями і температурою, а також корозії через агресивне робоче середовище, зокрема хлоридовмісне та водневмісне.

Нижче запропоновано оцінити довговічність теплообмінних труб в умовах повзучості з урахуванням впливу корозивного середовища на основі енергетичного підходу [4, 5]. Розроблений метод і програмне забезпечення дає змогу оцінити накопичення дефектів і появу тріщин. В цьому випадку вхідними даними для розрахунків є результати випробувань трубчастих зразків, добре відомих для більшості матеріалів за різних температур. Накопичення дефектів під впливом корозивного середовища описуємо двома способами: за допомогою класичних розв'язків задачі Ляме для трубчастих зразків [6] та за енергетичним підходом [4, 5].

**Деформації повзучості в хлоридовмісному та водневмісному середовищах.** Для опису стандартних кривих повзучості запропоновано багато спрощених визначальних співвідношень.

Для початку у всіх підходах розділяють деформацію на її пружну і пластичну складові:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^{cr}. \quad (1)$$

В загальному випадку деформацію повзучості приймають як добуток функцій напруження  $\sigma$ , часу  $t$  і температури  $T$  [7]:

$$\varepsilon^{cr} = f_1(\sigma) f_2(t) f_3(T). \quad (2)$$

Для врахування впливу корозивного середовища аналогічно введемо функцію  $f_4(\sigma; \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k, T)$ , яка залежить від певних параметрів  $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k$ , які характеризують середовище, і температури  $T$ . Зокрема, в праці [6] вона має вигляд

$$f_4(\sigma; \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k, T) = A_1 \cdot 10^{n\sigma + m_1\chi}, \quad (3)$$

де  $A_1, n, m_1, B, m, A$  – константи, які характеризують стійкість сталі до корозійного розтріскування за заданої температури;  $\chi$  – відсотковий вміст хлориду магнію у розчині.

Вплив водневмісного середовища враховано у функції  $f_5(T, C_H, t)$  [8]:

$$f_5(T, C_H, t) = 1 + \alpha_H C_H(T, t), \quad (4)$$

де  $C_H$  – концентрація водню в металі, а параметр  $\alpha_H$  відображає вплив водню на швидкість деформацій повзучості.

Концентрацію водню визначали за формулами [9]

$$C = K_s(T) \cdot \sqrt{P}, \quad K_s(T) = 46,8 \exp(-980/T). \quad (5)$$

Отже, деформації повзучості із врахуванням впливу хлоридовмісного та водневмісного середовищ можемо записати у вигляді

$$\begin{aligned} \varepsilon^{cr} &= f_1(\sigma) f_2(t) f_3(T) f_4(\sigma; \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k, T) f_5(C_H, T, t) = \\ &= A_1 \cdot B \sigma_{eq}^m 10^{n\sigma + m_1\chi} \cdot (1 + \alpha C_H) \cdot t. \end{aligned} \quad (6)$$

**Енергетичний підхід для оцінювання залишкового ресурсу елементів конструкцій.** Щоб описати нагромадження пошкодження в локальному об'ємі згідно з енергетичним підходом, вводимо міру пошкодження  $\omega(t)$ , яка характеризує відношення енергії пружно-пластичного деформування локального об'єму до її критичного значення у водні  $W_C$  [4, 5, 10–15]

$$\omega = \frac{W(x, y, z, t)}{W_C}, \quad (7)$$

де  $W(x, y, z, t) = \int_0^t \sigma_{eq}(x, y, z, \tau) \dot{\varepsilon}_{ij}^{cr}(x, y, z, \tau) d\tau$  – поточне значення енергії деформування;  $\sigma_{eq}$  – еквівалентні напруження;  $\dot{\varepsilon}_{ij}^{cr}$  – швидкість деформацій повзучості локального об'єму елемента.

Вважаємо, що до початку експлуатації матеріал без дефектів, тобто  $\omega|_{t=0} = 0$ . Умову рівності параметра пошкодження приймаємо за критерій руйнування, що дозволяє визначити час до руйнування зразка  $t^*$ .

$$\omega(x, y, z, t^*) = 1. \quad (8)$$

Швидкість повзучості отримуємо із рівності (6)

$$\frac{\partial \epsilon_{ij}^{cr}}{\partial t} = A \sigma_{eq}^m 10^{n\sigma + m_1 \chi} (1 + \alpha C_H). \quad (9)$$

Запропонований підхід для визначення параметра  $\omega(t)$  дає змогу достовірно описати складний процес нагромадження пошкоджень матеріалу, не накладаючи додаткових гіпотез на закони нагромадження пошкодження в локальному об'ємі.

#### Обчислення терміну експлуатації теплообмінних труб парогенераторів.

Під час експлуатації парогенераторів атомних електростанцій (АЕС) із водояним енергетичним реактором (ВВЕР) спостерігаємо руйнування внаслідок корозійного розтріскування теплообмінних труб, виготовлених із аустенітної нержавної сталі [12]. Нержавні хромонікелеві сталі аустенітного класу, зокрема 08X18H10T, широко застосовують для виготовлення різноманітних відповідальних елементів обладнання теплових і ядерних енергоустановок. Володіючи високою стійкістю проти суцільної корозії, вони виявляють схильність до корозійного розтріскування в хлоридовмісних середовищах. Ще одним важливим чинником, який знижує міцність матеріалів, є водневмісне середовище. Тому як еквівалент агресивного робочого середовища другого контуру, в якому експлуатують теплообмінні труби парогенераторів, приймаємо розчини хлориду магнію та водню. Необхідні для обчислення корозійного розтріскування геометричні розміри теплообмінних труб парогенераторів АЕС із ВВЕР наведені в таблиці [3].

#### Геометричні параметри поперечного перерізу теплообмінних труб парогенераторів АЕС із ВВЕР

Тип парогенератора	$r_1$ , mm	$r_2$ , mm	$\alpha = r_1 / r_2$
ПГВ-1000	6,5	8	0,8125
ПГВ-4	6,6	8	0,8250
ПГВ-1	9	10,5	0,8571

За розрахункову модель прийнято три тривимірні порожнисті циліндри, змодельовані відповідно до реальних розмірів теплообмінних труб парогенераторів (рис. 1), навантажених різними тисками ( $P = 10; 13; 16$  та  $20$  МПа) із врахуванням впливу розчину хлориду магнію (5% та 10%) та відповідних концентрацій водню ( $C_H = 51; 58; 65$  та  $72$  ppm) (5).

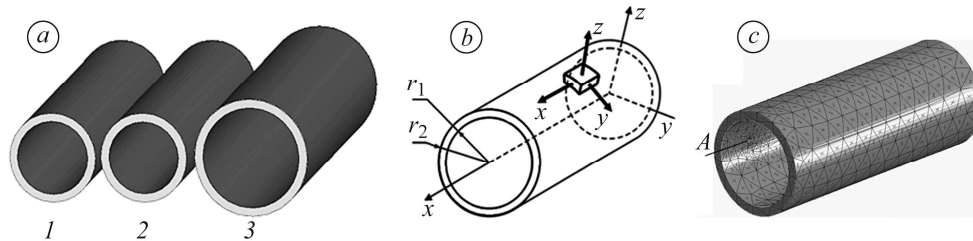


Рис. 1. Фрагменти теплообмінних труб (а), їх розрахункова схема (b) та розбиття на скінченні елементи (с): 1 – ПГВ-1000; 2 – ПГВ-4; 3 – ПГВ-1.

Fig. 1. Heat exchanger pipe fragment (a), their calculation scheme (b) and splitting into finite elements (c): 1 – ПГВ-1000; 2 – ПГВ-4; 3 – ПГВ-1.

Використовуючи співвідношення (7) та (9), за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) здійснили теоретичні обчислення. Для них використано програмний пакет MSC Marc Mentat 2016.0.0 та власні модулі, розроблені на мові програмування Fortran.

Під час скінченно-елементного моделювання фрагменти труб розбито на 10395 елементів тетраєдоподібної форми із згущенням сітки в околі концентратора напружень (точка *A* на рис. 1с), де енергія пружно-пластичного деформування є максимальною.

В результаті отримали (рис. 2) залежність параметра пошкодження від часу для парогенератора ПГВ-1 під впливом хлоридовмісного та водневмісного середовищ за різних тисків та концентрацій водню.

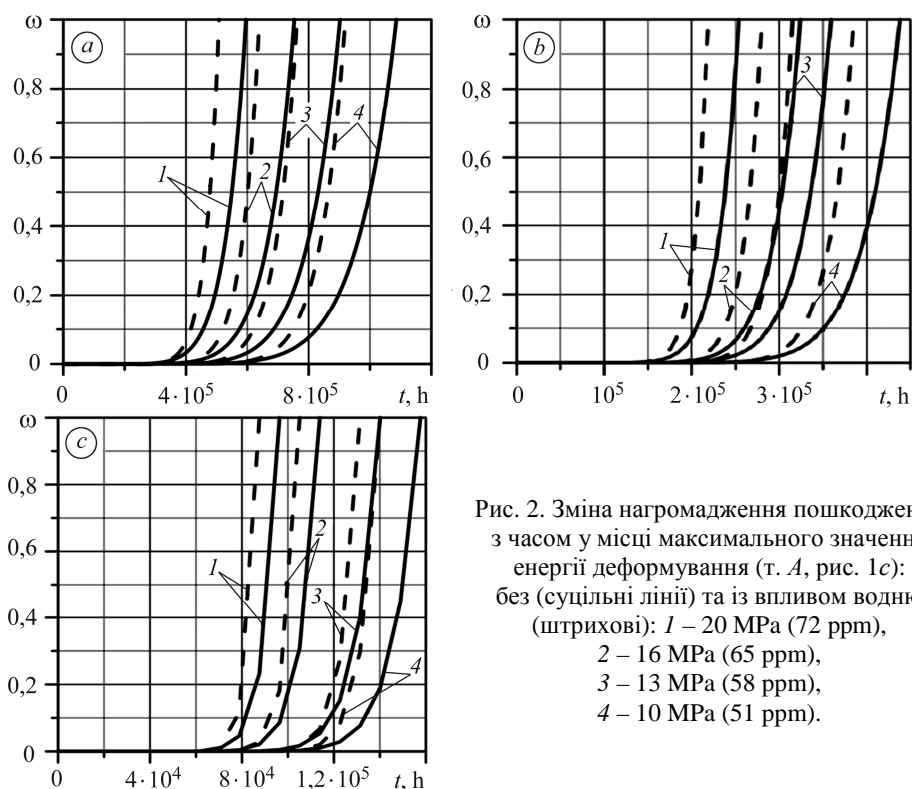


Рис. 2. Зміна нагромадження пошкодження з часом у місці максимального значення енергії деформування (т. *A*, рис. 1с): без (суцільні лінії) та із впливом водню (штрихові): 1 – 20 МПа (72 ppm), 2 – 16 МПа (65 ppm), 3 – 13 МПа (58 ppm), 4 – 10 МПа (51 ppm).

Fig. 2. Changes in damage accumulation over time at the place of maximum deformation energy (p. *A*, Fig. 1c) without hydrogen (solid lines) and with the influence of hydrogen (dashed lines): 1 – 20 MPa (72 ppm), 2 – 16 MPa (65 ppm), 3 – 13 MPa (58 ppm), 4 – 10 MPa (51 ppm).

Із критерію руйнування встановлено залежність часу до руйнування (8) теплообмінних труб від внутрішнього тиску для різних парогенераторів із та без врахування наводнювання та розчину  $MgCl_2$  (рис. 3). Результати одержали для теплообмінних труб трьох видів: ПГВ-1, ПГВ-4 та ПГВ-1000. Як бачимо, із підвищенням в розчині концентрації  $MgCl_2$  істотно знижується ресурс теплообмінних труб внаслідок інтенсифікації фізико-хімічних процесів за взаємодії поверхні труб з агресивним середовищем. За впливу 5% хлориду магнію термін експлуатації теплообмінних труб парогенератора ПГВ-1000 зменшується від 129 до 58 years. Зі збільшенням вмісту  $MgCl_2$  від 5 до 10% довговічність знижується на 15 years. Експлуатаційний ресурс труб парогенератора ПГВ-1 менший на 17% за ПГВ-4 і на 28% за ПГВ-1000.

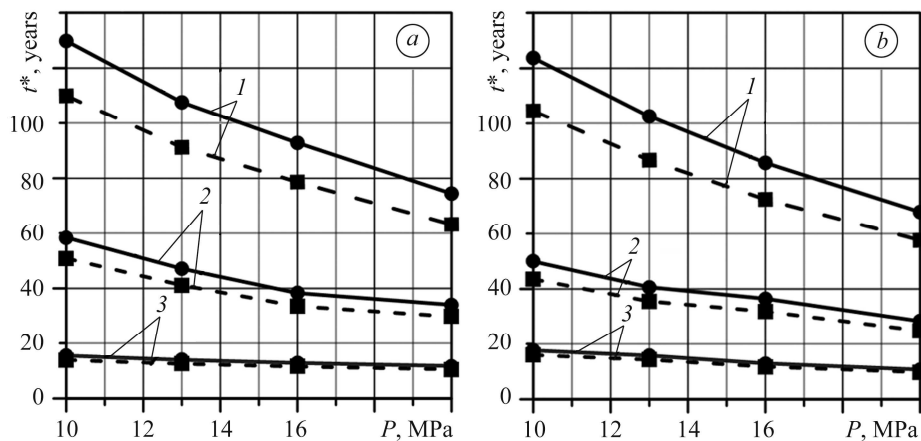
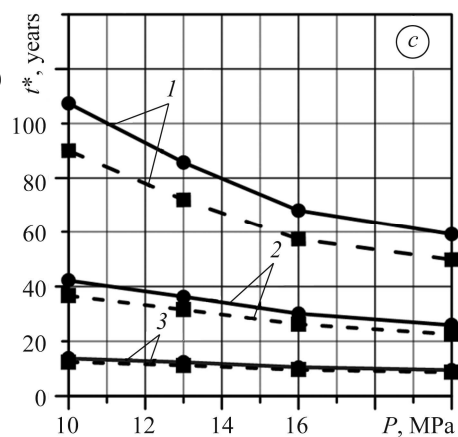


Рис. 3. Залежність часу до руйнування від внутрішнього тиску в т. А (рис. 1с) труб парогенераторів ПГВ-1000 (а), ПГВ-4 (b) та ПГВ-1 (с): без (суцільні лінії) та з врахуванням водневмісного середовища (штрихові); 1 – без розчину  $MgCl_2$ , 2 – в 5% розчині  $MgCl_2$ , 3 – в 10% розчині  $MgCl_2$ .

Fig. 3. Dependence of time to failure on internal pressure at point A (Fig. 1c) of tubes of steam generators ПГВ-1000 (a), ПГВ-4 (b) та ПГВ-1 (c): with no account (solid lines), and with account of hydrogen-containing media (dashed lines): 1 – without  $MgCl_2$ , 2 – in 5%  $MgCl_2$  solution, 3 – in 10%  $MgCl_2$  solution.



## ВИСНОВКИ

Визначено напружено-деформований стан теплообмінних труб парогенераторів АЕС із ВВЕР, виготовлених із нержавної хромонікелевої сталі аустенітного класу 08X18H10T. Обчислено параметр пошкодження металу труби в розчині хлориду магнію з концентрацією 5...10% та водневмісному середовищі. Використовуючи енергетичний критерій, визначили ресурс прямолінійної ділянки теплообмінних труб парогенераторів атомних електростанцій. За цими результатами встановили суттєвий вплив зміни тиску та наявності агресивних середовищ на час до руйнування.

**Acknowledgements.** This work was supported by the National Research Foundation of Ukraine (Project Number: 2020.02/0049).

1. Кесслер Г. Ядерная энергетика. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 264 с.
2. Thomas S. The economics of nuclear power: an update. – Heinrich-Böll-Stiftung, European Union, 2010. – 72 p.
3. Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций / Б. И. Лукасевич, Н. Б. Трунов, Ю. Г. Драгунов, С. Е. Давиденко. – М.: ИКЦ “Академкнига”, 2004. – 392 с.
4. Гембара О. В., Чепіль О. Я., Гембара Н. Т. Вплив параметрів дискретизації на точність числового розв’язку тривимірної задачі дифузії водню // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – 52, № 2. – С. 119–123.  
(Hembara O. V., Chepil’ O. Y., and Hembara N. T. Influence of the parameters of discretization on the accuracy of numerical solution of the three-dimensional problem of hydrogen diffusion // Materials Science. – 2016. – 52, № 2. – P. 280–286.)

5. *Fabing Qin., Гембара О. В., Чепіль О. Я.* Моделювання впливу водню на несучу здатність елементів енергетичного обладнання в умовах температурної повзучості // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – **53**, № 4. – С. 99–106.  
(*Qin F., Hembara O. V., and Chepil O. Y.* Modeling of the influence of hydrogen on the bearing ability of elements of the power-generating equipment under the conditions of temperature creep // *Materials Science*. – 2018. – **53**, № 4. – P. 532–540.)
6. *Морачковський О. К., Ромашиов Ю. В.* Континуальна модель росту трещин корозійного растрескивання для расчета ресурса конструкций // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – **46**, № 2. – С. 111–116.  
(*Morachkovskii O. K. and Romashov Yu. V.* Continual model of propagation of corrosion cracks for the evaluation of the service life of structures // *Materials Science*. – 2010. – **46**, № 2. – P. 254–259.)
7. *Бойл Дж., Спенс Дж.* Анализ напряжений в конструкциях при ползучести. – М.: Мир, 1986. – 360 с.
8. *Андрейків О. Є., Сас Н. Б.* Механіка руйнування металевих пластин за високотемпературної повзучості // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – **42**, № 2. – С. 62–68.  
(*Andreikiv O. E. and Sas N. B.* Fracture mechanics of metallic plates under the conditions of high-temperature creep // *Materials Science*. – 2006. – **42**, № 2. – P. 210–219.)
9. *Андрейків О., Гембара О.* Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2008. – 346 с.
10. *Experimental and computed stress distribution ahead of a notch in a pressure vessel: Application of T-stress conception / H. Moustabchir, Z. Azari, S. Hariri, and I. Dmytrakh // Computational Mater. Sci.* – 2012. – **58**. – P. 59–66.
11. *The energy approach to the evaluation of hydrogen effect on the damage accumulation / Y. Ivanytskyi, Y. Kharchenko, O. Hembara, O. Chepil, Y. Sapuzhak, and N. Hembara // 6<sup>th</sup> Int. Conf. Fracture Mechanics of Materials and Structural Integrity.* – Lviv, 2019. – P. 126–133.
12. *Сиротюк А. М., Дмитрах І. М.* Методи оцінювання руйнування та міцності трубопровідних сталей та конструкцій за дії робочих середовищ. Ч. II. Вплив водневмісних середовищ // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – **50**, № 4. – С. 7–17.  
(*Syrotiuk A. M. and Dmytrakh I. M.* Methods for the evaluation of fracture and strength of pipeline steels and structures under the action of working media. Part 2. Influence of hydrogen-containing media // *Materials Science*. – 2015. – **50**, № 4. – P. 475–487.)
13. *Гембара О. В., Чепіль О. Я., Гембара Т. В.* Застосування енергетичного підходу до оцінювання робоздатності барабана парового котла за термоцикування та наводнювання // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – **53**, № 1. – С. 90–95.  
(*Hembara O. V., Chepil O. Y., and Hembara T. V.* Application of the energy approach to the evaluation of the serviceability of the drum of a steam boiler subjected to thermal cycling and hydrogenation // *Materials Science*. – 2017. – **53**, № 1. – P. 102–108.)
14. *Іваницький Я. Л., Гембара О. В., Чепіль О. Я.* Оцінювання довговічності елементів енергетичного обладнання з урахуванням впливу експлуатаційного середовища // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – **51**, № 1. – С. 93–101.  
(*Ivanyts'kyi Ya. L., Hembara O. V., and Chepil' O. Ya.* Determination of the durability of elements of power-generating equipment with regard for the influence of working media // *Materials Science*. – 2015. – **51**, № 1. – P. 104–113.)
15. *Кількісний аналіз структурних змін у сталі внаслідок високотемпературної витримки у водні / О. З. Студент, Б. П. Русин, Б. В. Кисіль, М. І. Кобасяр, Т. П. Стахів, А. Д. Марков // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2003. – **39**, № 1. – С. 22–28.  
(*Quantitative analysis of structural changes in steel caused by high-temperature holding in hydrogen / O. Z. Student, B. P. Rusyn, B. V. Kysil, M. I. Kobasyar, T. P. Stakhiv, and A. D. Markov // Materials Science.* – 2003. – **39**, № 1. – P. 17–24.)

Одержано 10.12.2020