

УДК 620.197.5: 669.788

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАГРОМАДЖЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ В УМОВАХ ПОВЗУЧОСТІ ТА КОРОЗІЙНОГО РОЗТРІСКУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

ZHIGANG LIU<sup>1</sup>, О. Я. ЧЕПІЛЬ<sup>2</sup>, Я. І. САПУЖАК<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Control Technology Institute, Wuxi Institute of Technology, Wuxi, China;

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

Розроблено математичну модель накопичення пошкоджень за повзучості та корозійного розтріскування конструкційних матеріалів, яку апробовано для визначення показників довговічності прямолінійної ділянки теплообмінних труб парогенераторів атомних електростанцій за складного навантаження. Встановлено вплив товщини труб, тиску в другому контурі і хімічного складу агресивного середовища на ресурс елементів конструкцій.

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

A mathematical model of damage accumulation under creep and corrosion cracking of structural materials was developed. The proposed model was tested to determine the life time of a rectilinear section of the heat exchange tubes of steam generators of nuclear power plants under complex loading. The influence of pipe thickness, pressure in the secondary circuit and chemical composition of the aggressive medium on the life time of structural elements was established.

**Keywords:** corrosive environment, creep, deformation energy, damage, durability.

**Вступ.** Через підвищені вимоги до якості і надійності конструкцій, схильних до тривалих складних навантажень, необхідно прогнозувати довговічність їх експлуатації з урахуванням різних особливостей, які можуть виникнути в реальних умовах. Робоче середовище, де розташовані конструкції або їх окремі елементи, – одне з найважливіших чинників впливу на характеристики повзучості і довготривалої міцності металів. Виявлено, що експлуатаційні властивості металів значно погіршуються внаслідок його дії [1–7], що супроводжується дифузійними і корозійними процесами в металі.

Пропонуємо оцінювати міцність структурних елементів в умовах повзучості, враховуючи вплив корозивного середовища, на основі енергетичного підходу [8, 9]. Цей метод і програмне забезпечення дають можливість спрогнозувати накопичення дефектів і зародження тріщин. Тут як вхідні дані для розрахунків використали результати випробувань трубчастих зразків. Накопичення дефектів під впливом корозивного середовища визначали за допомогою класичних розв'язків задачі Ляме [10] та за енергетичним підходом [8, 9].

**Деформації повзучості в корозивному середовищі.** Для опису стандартних кривих повзучості запропоновано багато спрощених одновимірних визначальних співвідношень. У всіх підходах деформацію поділяють на пружну і пластичну компоненти:

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

Контактна особа: О. Я. ЧЕПІЛЬ, e-mail: chepil@ipm.lviv.ua

Загалом деформація повзучості є функцією напруження  $\sigma$ , часу  $t$  і температури  $T$

$$\varepsilon^{cr} = f(\sigma, t, T), \quad (2)$$

яку найчастіше подають як добутки функцій

$$\varepsilon^{cr} = f_1(\sigma) f_2(t) f_3(T), \quad (3)$$

що описані [11] різними законами (табл. 1).

**Таблиця 1. Найпростіші визначальні співвідношення повзучості**

$f_1(\sigma)$	$f_2(t)$	$f_3(T)$
$B\sigma^n$ – закон Нортонна	$t$ – для другої стадії повзучості	$A \exp(-\Delta H/kT)$ – закон Арреніуса
$Csh(\alpha\sigma)$ – закон Прандтля	$Bt^m$ – закон Бейлі	
$D \exp(\beta\sigma)$ – закон Дорна	$(1 + bt^{1/s}) \exp(kt)$ – закон Андраде	
$A[sh(\gamma\sigma)]^n$ – закон Гарофало	$\sum_j a_j t^{m_j}$ – закон Грехема і Уоллеса	

У табл. 1 всі символи, окрім  $\sigma$ ,  $t$  і  $T$ , є константами – характеристиками матеріалу. Для врахування впливу корозивного середовища аналогічно введемо функцію  $f_4(\sigma; \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)$ , яка залежить від параметрів  $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k$ , що описують його властивості. Зокрема, в праці [10] для  $T = \text{const}$  її прийняли у такому вигляді:

$$f_*(\sigma; \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k, T) = f_3(T) \cdot f_4(\sigma; \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k) = A_1 \cdot 10^{n\sigma + m_1 \chi}, \quad (4)$$

де  $A_1, n, m_1$  – константи, що характеризують тривкість сталі до корозійного розтріскування за заданої температури;  $\chi$  – відсотковий вміст хлориду магнію у розчині.

Отже, деформації повзучості із врахуванням впливу корозивного середовища можемо записати так:

$$\varepsilon^{cr} = f_1(\sigma) \cdot f_2(t) \cdot f_*(\sigma; \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k, T) = A_1 \cdot B \sigma_{ekv}^n 10^{n\sigma + m_1 \chi} t. \quad (5)$$

**Енергетичний підхід для оцінки залишкового ресурсу елементів конструкцій.** Щоб описати нагромадження пошкоджень у локальному об'ємі, згідно з енергетичним підходом вводимо міру пошкодження  $\omega(t)$ , яку визначає відношення енергії пружно-пластичного деформування локального об'єму до її критичного значення у водні  $W_C$  [8, 9]:

$$\omega = W(x, y, z, t) / W_C, \quad (6)$$

де  $W(x, y, z, t) = \int_0^t \sigma_{ekv}(x, y, z, \tau) \dot{\varepsilon}_{ij}^{cr}(x, y, z, \tau) d\tau$  – поточне значення енергії деформації;

$\sigma_{ekv}$  – еквівалентні напруження;  $\dot{\varepsilon}_{ij}^{cr}$  – швидкість деформацій повзучості локального об'єму елемента.

Прийняли, що до початку експлуатації матеріал був без дефектів, тобто  $\omega|_{t=0} = 0$ . Умову  $\omega(x, y, z, t_*) = 1$  вважали критерієм руйнування, за яким можна визначити час до руйнування зразка  $t_*$ .

Швидкість повзучості, прийнявши  $A = A_1 \cdot B$ , отримуємо із рівності (5):

$$\frac{\partial \varepsilon_{ij}^{cr}}{\partial t} = A \sigma_{ekv}^m 10^{n\sigma + m_1 \chi} . \quad (7)$$

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

**Визначення довговічності прямолинійної ділянки теплообмінних труб парогенератора.** Під час експлуатації парогенераторів атомних електростанцій теплообмінні труби із аустенітної нержавної сталі руйнуються внаслідок корозійного розтріскування [12]. З нержавних хромонікелевих сталей аустенітного класу, зокрема типу 18-8, виготовляють різноманітні відповідальні елементи обладнання теплових і ядерних енергоустановок. Незважаючи на високу тривкість до суцільної корозії, вони схильні до корозійного розтріскування в хлоридвмісних середовищах. Тому як еквівалент агресивного робочого середовища другого контуру, в якому експлуатуються теплообмінні труби парогенераторів, використовували розчини хлориду магнію. Геометричні характеристики поперечного перерізу труб горизонтальних парогенераторів розраховували, беручи до уваги реальні співвідношення внутрішнього і зовнішнього радіусів  $\alpha = r_1/r_2$  (рис. 1):  $\alpha = 0,8125$  – для парогенератора типу ПГВ-1000;  $\alpha = 0,825$  – для ПГВ-213;  $\alpha = 0,8571$  – для ПГВ-1 [13].

Для розрахунків використовували тривимірний порожнистий циліндр, розміри якого відповідали реальним розмірам теплообмінних труб (рис. 1), навантажений різними тисками ( $P = 10; 13; 16$  та  $20$  МПа) та підданий впливу розчину хлориду магнію (5 та 10%). Обчислювали, застосовуючи метод скінчених елементів (МСЕ). Під час моделювання сітки фрагмент труби розбивали на 8400 елементів паралелепіпедоподібної форми.

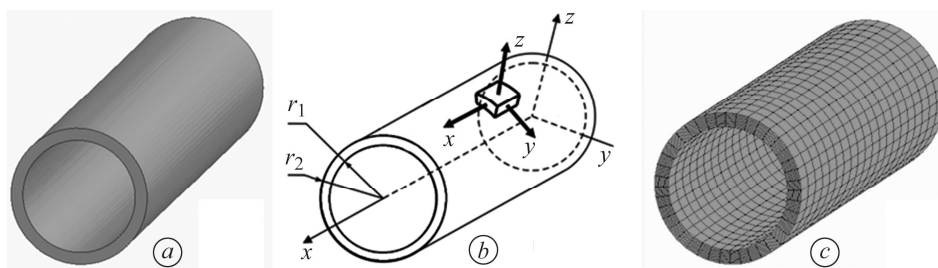


Рис. 1. Фрагмент теплообмінної труби (а), її розрахункова схема (b) та розбиття на скінченні елементи (с).

Fig. 1. Heat exchanger pipe fragment (a), its calculation mode (b) and splitting into finite elements (c).

Обчислення виконували для труб різної товщини. Визначали напружено-деформований стан циліндра і розподіл еквівалентних напружень по товщині труби за тиску 20 МПа (рис. 2).

Отримані результати порівнювали із аналітичними розв'язками задачі Ляме для деформівного лінійно-пружного товстостінного осесиметричного циліндра зі співвідношенням радіусів  $\alpha = r_1/r_2$  і внутрішнім тиском  $P$  [14, 15]:

$$\sigma_{\text{ekv}} = \frac{2\alpha^2}{1-\alpha^2} P. \quad (8)$$

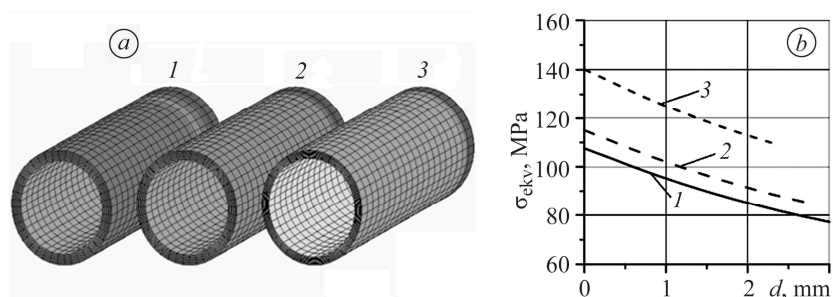


Рис. 2. Розподіл (а) та графічне зображення (b) еквівалентних напружень, визначених по товщині теплообмінних труб: 1 –  $\alpha = 0,8571$ ; 2 – 0,825; 3 – 0,8125.

Fig. 2. Distribution (a) and graphical representation (b) of equivalent stresses determined by the thickness of the heat exchange pipes: 1 –  $\alpha = 0.8571$ ; 2 – 0.825; 3 – 0.8125.

У результаті побудували розподіли еквівалентних напружень за різних тисків (рис. 3).

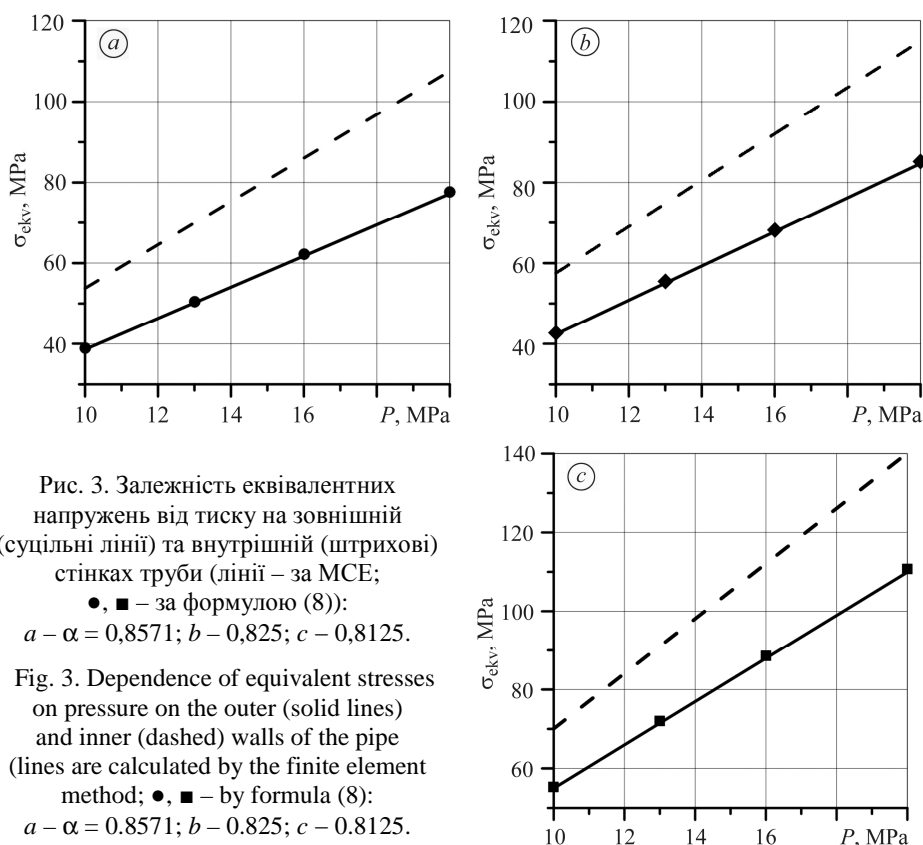


Рис. 3. Залежність еквівалентних напружень від тиску на зовнішній (суцільні лінії) та внутрішній (штрихові) стінках труби (лінії – за МСЕ; ●, ■ – за формулою (8):  
a –  $\alpha = 0,8571$ ; b – 0,825; c – 0,8125.

Fig. 3. Dependence of equivalent stresses on pressure on the outer (solid lines) and inner (dashed) walls of the pipe (lines are calculated by the finite element method; ●, ■ – by formula (8):  
a –  $\alpha = 0.8571$ ; b – 0.825; c – 0.8125.

Як бачимо, еквівалентні напруження на зовнішній стінці труби добре корелюють із отриманими за формулою (8). Але на внутрішній стінці вони помітно вищі. Тому надзвичайно важливо виконувати дослідження саме тут, оскільки, найімовірніше, руйнування почнеться звідси.

**Вплив корозивного середовища на нагромадження пошкоджень та час експлуатації теплообмінних труб.** Місцем зародження пошкоджень вважали той локальний об'єм матеріалу, де енергія пружно-пластичного деформування максимальна.

Рис. 4 ілюструє зміну параметра пошкодження з часом експлуатації з урахуванням і без впливу корозивного середовища для теплообмінних труб різної товщини за тиску 20 МПа. Як бачимо, середовище суттєво впливає на нагромадження пошкоджень металу та довговічність теплообмінних труб, а також на час до їх руйнування. Результати розрахунків подано у табл. 2.

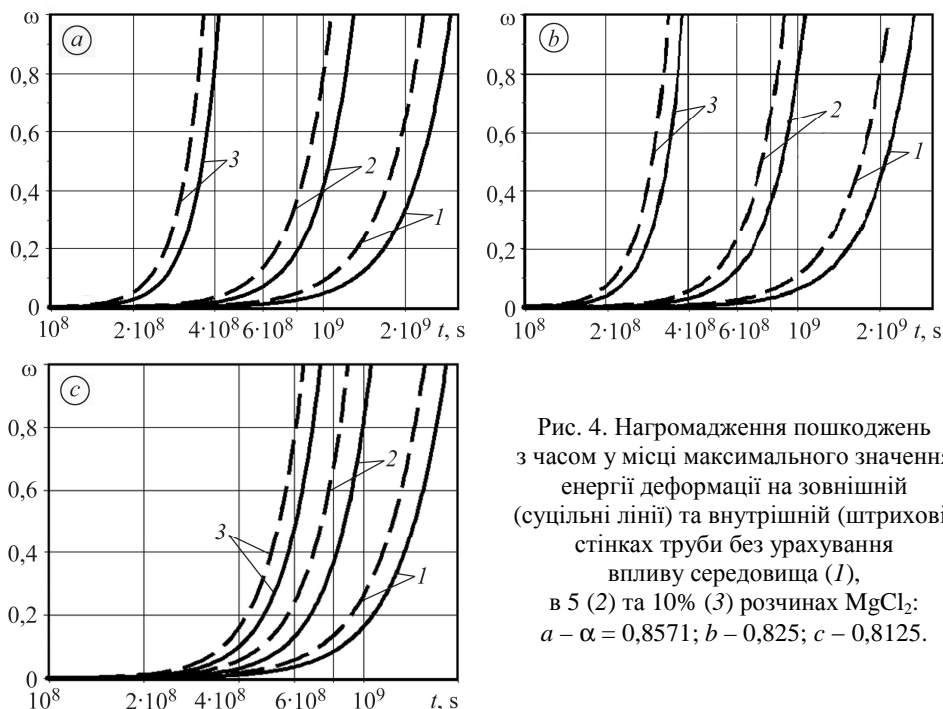


Рис. 4. Нагромадження пошкоджень з часом у місці максимального значення енергії деформації на зовнішній (суцільні лінії) та внутрішній (штрихові) стінках труби без урахування впливу середовища (1), в 5 (2) та 10% (3) розчинах  $MgCl_2$ :  $a - \alpha = 0,8571$ ;  $b - 0,825$ ;  $c - 0,8125$ .

Fig. 4. Accumulation of damage with time in place of the highest strain energy on the outer wall of the pipe (solid lines), on the inner wall (dashed lines); without considering the environment effect (1), in 5 (2) and in 10% (3) solutions of  $MgCl_2$  (3):  $a - \alpha = 0.8571$ ;  $b - 0.825$ ;  $c - 0.8125$ .

**Таблиця 2. Термін експлуатації теплообмінних труб у повітрі та розчині хлориду магнію за різної їх товщини**

Корозивне середовище	Час до руйнування, year					
	ПГВ-1000, $\alpha = 0,8125$		ПГВ-213, $\alpha = 0,825$		ПГВ-1, $\alpha = 0,8571$	
	всередині, МСЕ	зовні, МСЕ формула (8)	всередині, МСЕ	зовні, МСЕ формула (8)	всередині, МСЕ	зовні, МСЕ формула (8)
Відсутнє	74,46	$\frac{92,4}{93,51}$	67,94	$\frac{82,23}{84,07}$	49,58	$\frac{56,69}{58,74}$
5% $MgCl_2$	34,05	$\frac{41,27}{39,68}$	28,35	$\frac{33,54}{35,68}$	20,45	$\frac{23,15}{24,89}$
10% $MgCl_2$	11,57	$\frac{13,8}{13,59}$	10,74	$\frac{12,0}{12,22}$	7,28	$\frac{7,93}{8,52}$

Виявили, що зі збільшенням вмісту хлориду магнію в експлуатаційному середовищі від 5 до 10% довговічність теплообмінних труб зменшується від 54 до 85%. Експлуатаційний ресурс труб парогенератора ПГВ-1000 більший на 17%, ніж ПГВ-213, і на 28% – ніж ПГВ-1. Також встановили, що трубчастий зразок руйнується всередині значно швидше, ніж ззовні (див. табл. 2). Тому дуже важливо визначити місце нагромадження пошкоджень саме всередині теплообмінної трубки, щоб достовірно визначити експлуатаційний ресурсу.

### ВИСНОВКИ

Розраховано напружено-деформований стан теплообмінних труб різних типів парогенераторів, виготовлених із нержавної хромонікелевої сталі аустенітного класу типу 18-8. Обчислено параметр пошкодження  $\omega(t)$  металу трубки в 5 та 10% розчинах хлориду магнію. Встановлено, що максимально метал пошкоджується на внутрішній стінці труби. Визначено ресурс прямолінійної ділянки теплообмінних труб парогенераторів атомних електростанцій, за результатами яких встановлено суттєву залежність ресурсу від розмірів труб, тиску та хімічного складу агресивного середовища.

*Acknowledgements This work was supported by Qinglan Project Subsidized by Colleges and Universities in Jiangsu Province.*

1. *Panasyuk V., Ivanytskyi Y., and Hembara O.* Assessment of hydrogen effect on fracture resistance under complex-mode loading // *Engin. Fract. Mech.* – 2012. – **83**, march. – P. 54–61.
2. *Гембара О. В., Андрейків О. Є.* Вплив наводнювання стінок нафтових та газових трубопроводів на їх ґрунтову корозію і довговічність // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2011. – **47**, № 5. – С. 27–34.  
(*Hembara O. V. and Andreikiv O. E.* Effect of hydrogenation of the walls of oil-and-gas pipelines on their soil corrosion and service life // *Materials Science.* – 2012 – **47**, № 5. – P. 598–607.)
3. *Визначення концентрації водню у зоні передруйнування біля вершини тріщини / Я. Л. Іваницький, О. В. Гембара, О. Д. Сміян, М. Ковалік // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2010. – **46**, № 6. – С. 51–55.  
(*Evaluation of the concentration of hydrogen in the process zone near the crack tip / Ya. L. Ivanyts'kyi, O. V. Hembara, O. D. Smiyan, and M. Kowalik // Materials Science.* – 2011. – **46**, № 6. – P. 769–774.)
4. *Гембара О. В., Терлецька З. О., Чепіль О. Я.* Визначення електричних полів у системі електроліт–метал // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2007. – **43**, № 2. – С. 71–77.  
(*Hembara O. V., Terlets'ka Z. O., and Chepil' O. Ya.* Determination of electric fields in electrolyte–metal systems // *Materials Science.* – 2007. – **43**, № 2. – P. 222–229.)
5. *Сташук М. Г., Дорош М. І.* Оцінювання напружень, обумовлених концентрацією водню у металі // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2015. – **51**, № 4. – С. 76–83.  
(*Stashchuk M. H. and Dorosh M. I.* Evaluation of stresses caused by hydrogen concentrated in the metal // *Materials Science.* – 2016. – **51**, № 4. – P. 520–529.)
6. *Stashchuk M. and Dorosh M.* Analytical evaluation of hydrogen induced stress in metal // *Int. J. of Hydrogen Energy.* – 2017. – **42**, № 9. – P. 6394–6400.
7. *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.)
8. *Jiang Qionqin, Гембара О. В., Чепіль О. Я.* Моделювання впливу водню на нагромадження пошкоджень у сталях за високотемпературної повзучості // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2019. – **55**, № 2. – С. 104–111.

- (*Jiang Q., Hembara O. V., and Chepil' O. Y.* Modeling of the influence of hydrogen on the accumulation of defects in steels under high-temperature creep // *Materials Science.* – 2019. – **55**, № 2. – P. 245–253.)
9. *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.)
10. *Морачковский О. К., Ромашов Ю. В.* Континуальная модель роста трещин коррозионного растрескивания 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.)
11. *Бойл Дж., Спенс Дж.* Анализ напряжений в конструкциях при ползучести. – М.: Мир, 1986. – 360 с.
12. *Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций* / Б. И. Лукаевич, Н. Б. Трунов, Ю. Г. Драгунов, С. Е. Давиденко. – М.: ИКЦ “Академкнига”, 2004. – 392 с.
13. *Ромашов Ю. В.* Оценка показателей долговечности теплообменных труб парогенераторов АЭС с ВВЭР на основе континуальной модели коррозионного растрескивания // *Ядерна та радіаційна безпека.* – 2012 – **3**, № 55. – С. 16–20.
14. *Прочность, устойчивость, колебания: Справ. в 3-х т.* – М.: Машиностроение, 1968. – Т. 2. – 464 с.
15. *Локощенко А. М.* Ползучесть и длительная прочность металлов. – М.: Физматлит, 2015. – 496 с.

Одержано 12.02.2020