

УДК 620.197.5: 669.788

## РОЗРАХУНОК РЕСУРСУ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ЗА ТРИВАЛОГО СТАТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ, ВИСОКОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ДІЇ ВОДНЮ

CHANG SHU<sup>1</sup>, О. В. ГЕМБАРА<sup>2,3</sup>, О. Я. ЧЕПІЛЬ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Northwest University of Political Science and Law, Shaanxi, China;

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

<sup>3</sup> Національний університет "Львівська політехніка"

Запропоновано енергетичний підхід для визначення показників довговічності елементів конструкцій теплоенергетичного обладнання. За допомогою цього підходу встановлено показники довговічності для барабана парового котла в умовах повзучості та наводнювання металу. Показано, що водень зменшує тривалість експлуатації металу за планової зупинки котла >15%, а за аварійної зупинки >20%. Встановлено, що аварійні зупинки зменшують час до руйнування для всіх досліджуваних рівнів наводнювання металу на 30...35% порівняно з плановим охолодженням.

**Ключові слова:** наводнювання матеріалу, повзучість, енергія деформування, пошкодження, довговічність.

Визначення ресурсу теплоенергетичного обладнання необхідне для продовження терміну його служби за нормативні межі, а також під час планування періодичності контролю його технічного стану і ремонтів, що забезпечує надійність і ефективність функціонування устаткування. Вибір методу прогнозування залишкового ресурсу залежить від виду деградації (корозії, втоми, повзучості, водневої деградації та ін.), а також від необхідної точності і достовірності прогнозу. За невисоких вимог до точності і достовірності застосовують спрощені методи, за необхідності гарантованих оцінок використовують уточнені методи на основі принципів і підходів механіки руйнування.

Оцінюючи міцність енергетичного обладнання, яке працює за високих температур і складних навантажень, необхідно враховувати повзучість матеріалу з нагромадженням незворотної деформації і пошкодження, які призводять згодом до появи тріщини [1–6]. Головна мета такої оцінки – коректно визначити час до руйнування конструкції на експериментальних результатах або на підставі феноменологічних теорій повзучості і тривалої міцності [7].

Нижче за допомогою раніше розробленої методики [8, 9] на базі енергетичного підходу визначили довговічність барабана парового котла з урахуванням повзучості та наводнювання матеріалу. Показано, що використання сучасних методів оцінки пошкодження обладнання дає змогу виявити додаткові чинники, які впливають на залишковий ресурс.

**Енергетичний підхід для оцінювання довговічності тривало експлуатованих елементів конструкцій.** Для реалізації раніше розробленої методики [9] розроблено алгоритм та складено програми, які дають можливість визначити:

1) напружено-деформований стан (НДС) елементів конструкцій у дво- та тривимірному формулюванні для довільної їх конфігурації із врахуванням впливу водню та повзучості металу;

2) розподіл концентрації водню в металі внаслідок наводнювання з робочого водневмісного середовища;

3) нагромадження пошкодження та довговічність елементів конструкцій за повзучості та наводнювання матеріалу. Для цього вводимо міру пошкодження  $\omega(t)$ , яка характеризує відносний об'єм нагромаджених у тілі пошкоджень, і є параметром пошкодження матеріалу. Зазвичай приймають, що до прикладення навантаження матеріал без дефектів, тобто  $\omega|_{t=0} = 0$ . Як критерій руйнування вибираємо умову рівності параметра пошкодження одиниці  $\omega(x, y, z, t_*) = 1$ . Ця умова дозволяє визначити час до руйнування зразка  $t_*$ .

Вхідними даними для розрахунків є результати випробувань зразків (криві повзучості).

Нагромадження пошкоджень в умовах впливу водню пропонуємо визначати за енергетичним підходом. Дослідження [1, 7, 9], виконані на різних матеріалах за різних температур, показують хорошу відповідність експериментальних і теоретичних кривих повзучості аж до моменту руйнування.

Для опису руйнування в матеріалі вводимо критерій руйнування локального елемента моделі, який базується на енергетичному підході нагромадження пошкоджень в локальному об'ємі. За міру енергетичного пошкодження прийнято відношення енергії пружно-пластичного деформування локального об'єму до її критичного значення у водні  $W_C^H$

$$\omega = W(x, y, z, t) / W_C^H, \quad (1)$$

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

Швидкість повзучості приймаємо у вигляді функції, граничний вид якої при  $C_H \rightarrow 0$  збігається зі стандартним степеневим законом повзучості [6]

$$\frac{\partial \epsilon_{ij}^{cr}}{\partial t} = A \sigma_{ekv}^m (1 + \alpha C_H), \quad (2)$$

де  $C_H$  – концентрація водню в металі; параметри  $A$ ,  $m$  характеризують повзучість на повітрі, а  $\alpha$  відображає вплив водню на швидкість деформацій повзучості.

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

**Розрахунок тривалої міцності барабана парового котла.** Барабан парового котла (рис. 1а) – один з найвідповідальніших його елементів, в якому акумулюється велика енергія. Цей елемент котла призначений для збору і роздачі робочого середовища, відокремлення пари від води, очищення пари, забезпечення запасів води в котлі. Барабан об'єднує залежно від місця встановлення пароутворювальні, паровідвідні і вихідні труби котла.

Умови роботи металу барабанів і колекторів парових котлів важкі, оскільки метал знаходиться одночасно під впливом високих температур, механічних напружень і агресивного середовища, в результаті чого в металі можуть змінюватись структура і механічні властивості, виникати повзучість і корозія, що може призвести до його руйнування. Руйнування барабана котла під час експлуатації – одна з найсерйозніших аварій, яка пов'язана з великими матеріальними збитками та важкими наслідками.

З технічної характеристики барабана відомі такі робочі параметри: температура пари  $T = 340^{\circ}\text{C}$ , робочий тиск пари  $P = 15,5 \text{ МПа}$ . З огляду на те, що стінки корпусу барабана товсті, а умови роботи пов'язані з високими температурами та інтенсивними навантаженнями, використовували для оцінки тривалої міцності неізотермічну теорію повзучості [10] з урахуванням наводнювання металу. Побудовано геометричну модель барабана котла (рис. 1*b*). Крім того, симетрія конструкції дає змогу не розглядати повністю тривимірну модель корпусу досліджуваного об'єкта, а змоделювати лише один його фрагмент (рис. 1*c*). Скінченно-елементна модель містила 124586 елементів.

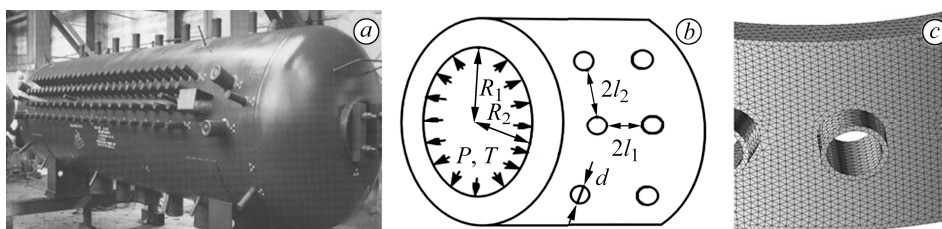


Рис. 1. Зовнішній вигляд барабана котла (*a*), розрахункова схема його фрагмента за нестационарного термосилового навантаження (*b*) та розбиття на скінченні елементи (*c*).

Fig. 1. Appearance of a boiler drum (*a*), calculation scheme of a boiler drum fragment with non-stationary heat-power load (*b*) and splitting into finite elements (*c*).

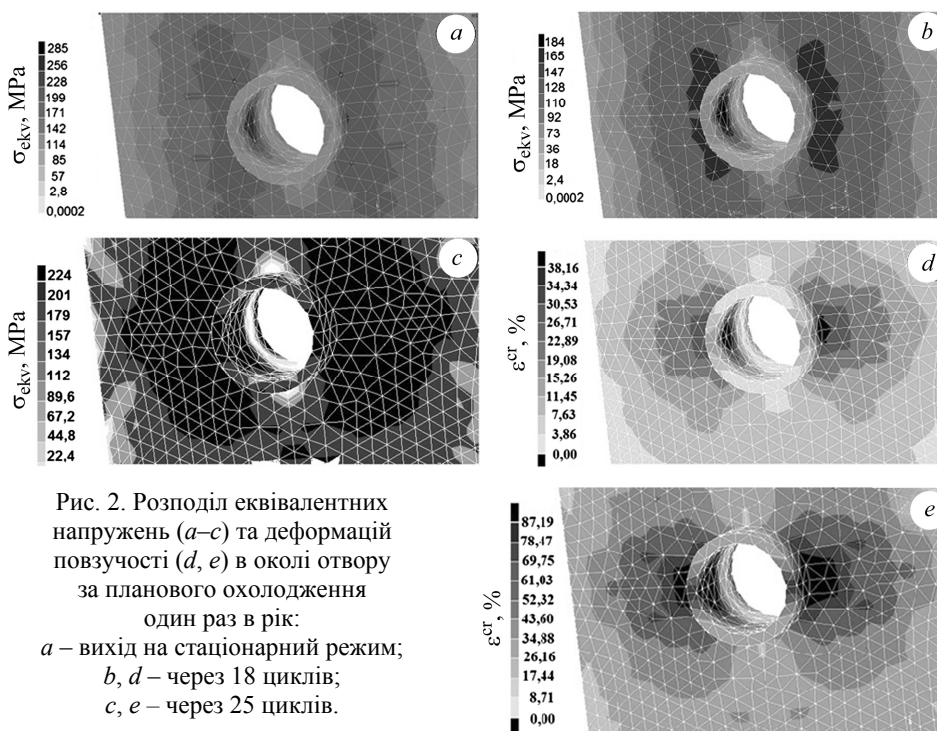


Рис. 2. Розподіл еквівалентних напружень (*a–c*) та деформацій повзучості (*d, e*) в околі отвору за планового охолодження один раз в рік:  
*a* – вихід на стаціонарний режим;  
*b, d* – через 18 циклів;  
*c, e* – через 25 циклів.

Fig. 2. Distribution of equivalent stresses (*a–c*) and creep strain (*d, e*) in the vicinity of the hole during planned cooling once a year: *a* – achieved steady-state conditions; *b, d* – after 18 cycles; *c, e* – after 25 cycles.

Для розрахунків створено підпрограму на мові програмування FORTRAN, яка реалізує розроблену модель повзучості з урахуванням впливу водню та об-

числове параметр пошкодження за енергетичним підходом. Розраховували для барабана, виготовленого зі сталі 22 К, з такими розмірами:  $R_1 = 0,805$  m,  $R_2 = 0,9$  m,  $l_1 = 0,27$  m,  $l_2 = 0,56$  m (рис. 1), діаметр отвору –  $d = 0,13$  m.

Досліджували за таких граничних режимів експлуатації: стаціонарний режим термоцикування упродовж 8700 h (рік) та планове охолодження зі швидкістю  $5^\circ\text{C/h}$ ; стаціонарний режим термоцикування упродовж 8700 h (рік) та аварійне охолодження зі швидкістю  $100^\circ\text{C/h}$ .

На першому етапі зв'язаної задачі теплопровідності і термопружності отримали початковий розподіл характеристик НДС у барабані котла для двох режимів навантаження. На рис. 2a–c подано розподіл еквівалентних напружень за планового охолодження. На другому етапі розв'язували задачу дифузії водню з урахуванням поля напружень та задачу повзучості з урахуванням впливу водню (рис. 2d, e). Спостерігаємо нерівномірний розподіл НДС як по товщині, так і по поверхнях стінки барабана. Найбільші значення еквівалентних напружень та деформацій повзучості зосереджені на внутрішній стінці отвору.

На рис. 3 показані часові зміни концентрації водню, деформації повзучості та еквівалентних напружень у локальних елементах на внутрішній (суцільні криві) та зовнішній (штрихові) стінках отвору. Як видно, максимальні значення цих характеристик досягаються в локальних елементах на внутрішній стінці отвору.

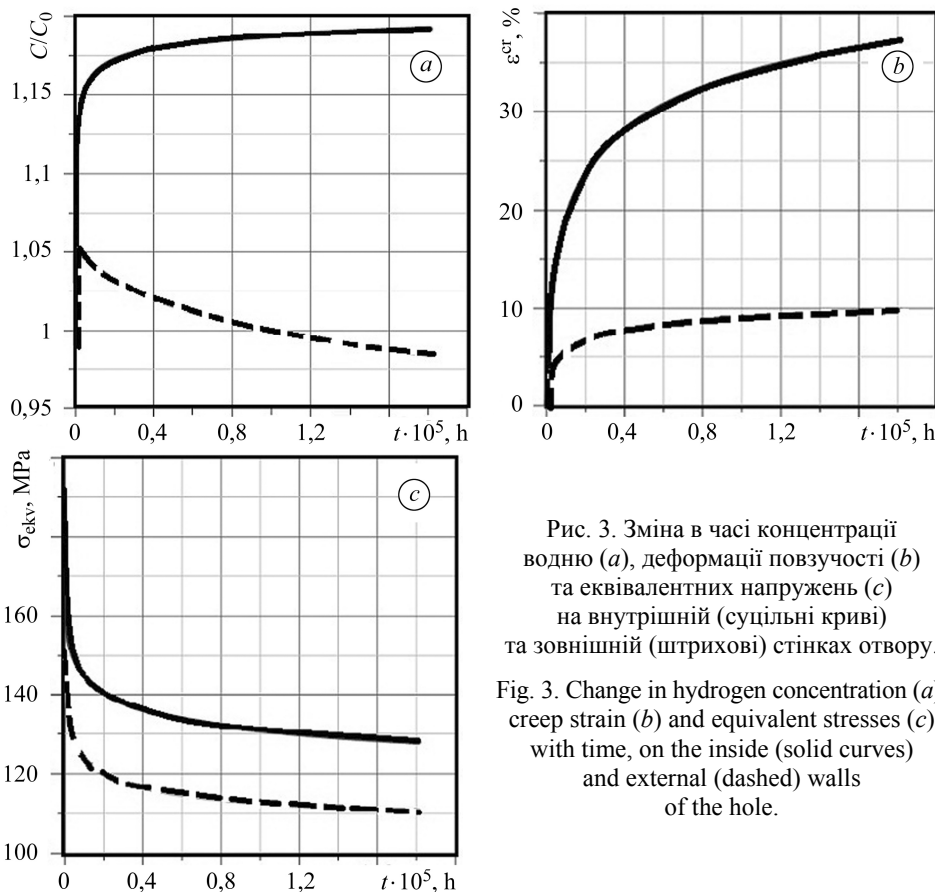


Рис. 3. Зміна в часі концентрації водню (a), деформації повзучості (b) та еквівалентних напружень (c) на внутрішній (суцільні криві) та зовнішній (штрихові) стінках отвору.

Fig. 3. Change in hydrogen concentration (a), creep strain (b) and equivalent stresses (c) with time, on the inside (solid curves) and external (dashed) walls of the hole.

Також побудовано розподіли еквівалентних напружень (рис. 4a) та відносної концентрації водню (рис. 4b) за один цикл навантаження в околі концентратора напружень та на лінії від контуру до точки посередині між контурами отворів за

планового (суцільні криві) та аварійного охолодження (штрихові) за локальної деформації повзучості 37 та 85%.

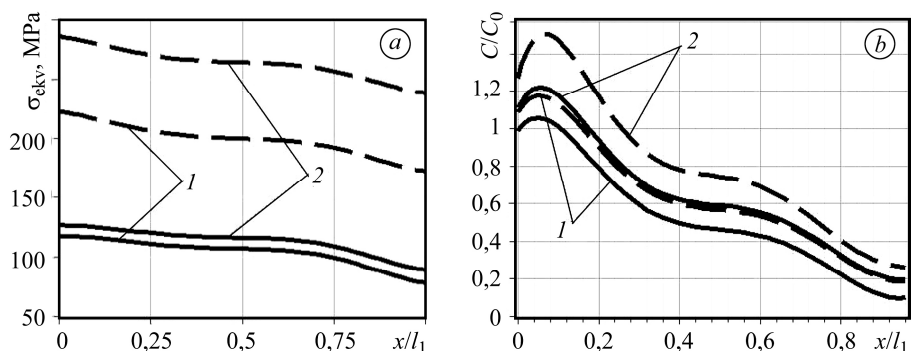


Рис. 4. Розподіл еквівалентних напружень (а) та концентрації водню (б) від контуру отвору до точки посередині між контурами за планового (суцільні криві) та аварійного охолодження (штрихові) за деформації повзучості 37 (1) та 85% (2).

Fig. 4. Distribution of the equivalent stresses (a) and hydrogen concentration (b) from the hole contour to the midpoint between the contours for the planned (solid curves) and emergency cooling (dashed) for creep strain of 37 (1) and 85% (2).

На рис. 5 показано зміну параметра пошкодження з часом експлуатації із врахуванням (штрихові криві) та без врахування (суцільні) дії водневмісного середовища для двох режимів експлуатації.

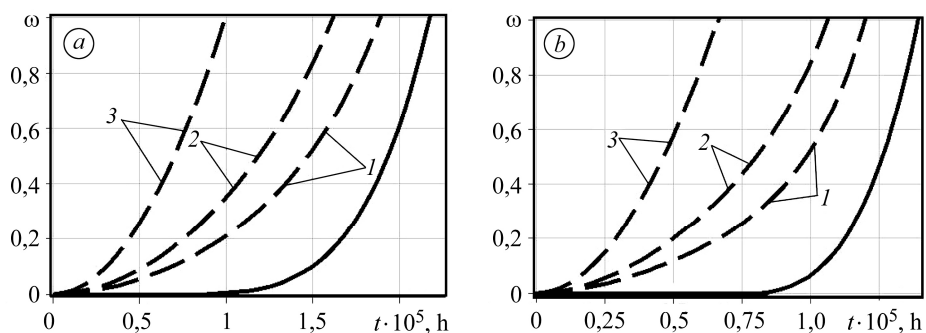


Рис. 5. Зміна параметра пошкодження з часом експлуатації за повзучості із врахуванням (штрихові криві) та без врахування (суцільні) дії водневмісного середовища за планового (а) та аварійного (б) охолодження один раз в рік; 1 –  $C_0 = 2$  ppm; 2 –  $C_0 = 3,4$  ppm; 3 –  $C_0 = 10$  ppm.

Fig. 5. Change in the parameter of damage with time modes for creep taking into account (dashed curves) and without taking into account (solid) the actions of hydrogen-containing medium at planned (a) and emergency (b) cooling once a year; 1 –  $C_0 = 2$  ppm; 2 –  $C_0 = 3.4$  ppm; 3 –  $C_0 = 10$  ppm.

За допомогою розрахунків встановили вплив концентрації водню та режимів охолодження на час до руйнування досліджуваного барабана парового котла. Результати подано на рис. 6 та у таблиці. Як бачимо, наводнювання стінки барабана суттєво впливає на його довговічність. Так, за концентрації водню  $C_0 = 2$  ppm, тривалість експлуатації за планових охолоджень зменшується на 12% порівняно з показником довговічності без водню. Відповідно за аварійної швидкості охолодження цей показник зменшується на 13% порівняно з ненаводненим матеріалом. Але вже за наводнювання до  $C_0 = 10$  ppm спостерігаємо різке зниження показників довговічності як за аварійного, так і за планового охолодження, майже на 50%.

Тому надзвичайно важливо удосконалити нормативні документи, які регламентують оцінювання ресурсу відповідальних елементів енергетичного обладнання, і ввести термін “концентрація водню” та враховувати її вплив під час прогнозування довговічності елементів наводнюваних конструкцій.

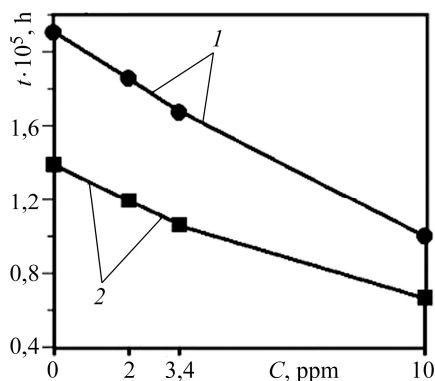


Рис. 6. Вплив водню на час до руйнування барабана котла за планового (1) та аварійного (2) охолодження один раз в рік.

Fig. 6. Influence of hydrogen on time before the destruction of the boiler drum at planned (1) and emergency (2) cooling once a year.

#### Показники довговічності барабана котла для двох режимів охолодження та різного рівня наводнювання матеріалу

Режими охолодження	Час до руйнування, h			
	Без водню	$C_0 = 2$ ppm	$C_0 = 3,4$ ppm	$C_0 = 10$ ppm
Планове	211040	185297	167653	100490
Аварійне	139378	120330	106507	66363

Другим важливим чинником, який впливає на показники довговічності, є швидкість охолодження. Як показують результати розрахунків, аварійні зупинки зменшують час до руйнування для всіх досліджуваних рівнів наводнювання металу на 30...35% порівняно з плановим охолодженням.

#### ВИСНОВКИ

Визначено НДС барабана парового котла високого тиску, виготовленого зі сталі 22 К, з урахуванням повзучості та наводнювання металу та його реальної геометричної форми. Обчислено параметр пошкодження  $\omega(t)$  металу барабана за двох режимів експлуатації. Встановлено, що максимально пошкоджується метал в околі отвору на внутрішній стінці. Показано, що водень пришвидшує нагромадження пошкоджень і зменшує тривалість експлуатації металу за планової зупинки котла на 15...40%, а за аварійної – на 20...50%. Встановлено, що аварійні зупинки зменшують час до руйнування для всіх досліджуваних рівнів наводнювання металу на 30...35% порівняно з плановим охолодженням.

**РЕЗЮМЕ.** Предложен энергетический подход для определения показателей долговечности элементов конструкций теплоэнергетического оборудования. С помощью этого подхода определены показатели долговечности для барабана парового котла в условиях ползучести и наводороживания металла. Показано, что водород уменьшает время эксплуатации металла при плановой остановке котла >15%, а за аварийной остановке >20%. Установлено, что аварийные остановки уменьшают время до разрушения для всех исследуемых уровней наводороживания металла на 30...35% по сравнению с плановым охлаждением.

**SUMMARY.** The energy approach is proposed for determining the durability of elements of heat and power equipment constructions. As an example of using the proposed approach, the definition of durability indicators for a steam boiler drum under conditions of creep and hydrogenation of the metal is considered. It is shown that hydrogen reduces the operating time of the

metal for the boiler a planned stop more than by 15%, and for an emergency stop by more than 20%. It has been established that emergency stops reduce the time to destruction for all investigated levels of hydrogenation of the metal by 30...35% compared to the planned cooling.

1. *Кучер М., Приходько Р.* Моделювання процесів повзучості й тривалої міцності матеріалів // Вісник ТНТУ. – 2013. – **71**, № 3. – С. 123–132.
2. *Оцінювання впливу зупинок технологічного процесу на зміну технічного стану металу головних парогонів ТЕС / Г. М. Никифорчин, О. З. Студент, Г. В. Кречковська, А. Д. Марков* // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – **46**, № 2. – С. 42–54.  
(*Nykyforchyn H. M., Student O. Z., Krechkovs'ka H. V., Markov A. D.* Evaluation of the influence of shutdowns of a technological process on changes in the in-service state of the metal of main steam pipelines of thermal power plants // *Materials Science*. – 2010. – **46**, № 2. – P. 177–189.)
3. *Повзучість у водні експлуатованої сталі 2.25Cr–Mo / Л. О. Бабій, О. З. Студент, А. Загурський, А. Д. Марков* // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – **43**, № 5. – С. 91–96.  
(*Babii L. O., Student O. Z., Zagorski A., Markov A. D.* Creep of degraded 2.25Cr–Mo steel in hydrogen // *Materials Science*. – 2007. – **43**, № 5. – P. 701–707.)
4. *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.  
(*Student O. Z., Rusyn B. P., Kysil' B. V., Kobasyar M. I., Stakhiv T. P., Markov A. D.* Quantitative analysis of structural changes in steel caused by high-temperature holding in hydrogen // *Materials Science*. – 2003. – **39**, № 1. – P. 17–24.)
5. *Андрейків О. Є., Сас Н. Б.* Докритичний ріст плоскої тріщини в тривимірному тілі за високотемпературної повзучості // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – **44**, № 2. – С. 19–26.  
(*Andreikiv O. E., Sas N. B.* Subcritical growth of a plane crack in a three-dimensional body under the conditions of high-temperature creep // *Materials Science*. – 2008. – **44**, № 2. – P. 163–174.)
6. *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., Sas N. B.* Fracture mechanics of metallic plates under the conditions of high-temperature creep // *Materials Science*. – 2006. – **42**, № 2. – P. 210–219.)
7. *Локощенко А. М.* Ползучесть и длительная прочность металлов. – М.: Физматлит, 2015. – 496 с.
8. *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., 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.)
9. *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.
10. *Кучер Н. К., Приходько Р. П., Боровик О. В.* Моделирование ползучести и длительной прочности материалов при неизотермических процессах деформирования // Проблемы прочности. – 2013. – № 1. – С. 128–139.

Одержано 27.10.2017