

Розрахунок залишкової довговічності елементів конструкцій в середовищі водню

О. Є. Андрейків, О. В. Гембара

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

Запропоновано алгоритм для визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій з тріщинами (водневий двигун і реактор гідрокрекінгу нафти) за одночасної дії на них водневмісного середовища та тривалого механічного навантаження.

Ключові слова: залишковий ресурс, тріщина, водень, механічне навантаження.

Вступ. Проблема оцінки та прогнозу працездатності елементів конструкцій тривалої експлуатації в умовах складного багаторежимного термосилового навантаження і дії водневмісного середовища пов'язана з утворенням тріщин водневого походження. Для таких конструкцій недостатньо проводити розрахунки для одного з режимів роботи, який за тими чи іншими міркуваннями приймається як найбільш небезпечний. Із метою достовірності прогнозу працездатності необхідно проаналізувати всю історію взаємодії з воднем і зміну температурного та напружено-деформованого стану (НДС) конструкції за всіма режимами циклів: пуск – номінальний режим – зупинка (штатна чи аварійна). Це зумовлено тим, що на будь-якому з етапів може скластися катастрофічне поєднання зовнішніх впливів та чинників водневої деградації металів.

Алгоритм для розрахунку елементів конструкцій на тривалу міцність на стадії зумовленого воднем докритичного росту тріщин у металах. Розрахунок конструкцій на міцність та довговічність в умовах складного багаторежимного термосилового навантаження і взаємодії з водневмісним середовищем включає наступні основні етапи:

аналіз умов експлуатації конструкції та можливих причин її руйнування;

визначення зміни температурного поля та перерозподілу водню в металі в найбільш небезпечних перерізах конструкції на кожному режимі експлуатації;

дослідження напружено-деформованого стану в околі дефекту і визначення розрахункових параметрів, що контролюють цей стан: коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН), розкриття тріщини та ін.;

експериментальне визначення характеристик тріщиностійкості матеріалу у водні;

дослідження кінетики руйнування, тобто докритичного підростання тріщин у середовищі водню, і на цій основі визначення залишкового ресурсу конструкції.

Задача першого етапу полягає в отриманні необхідних для розрахунку вихідних даних щодо особливостей навантаження матеріалу в конструкції і його взаємодії з водневмісним середовищем. На основі даних про робочі

процеси і режими (механічне навантаження, температурні поля, наявність водню, параметри середовища) з врахуванням інформації про чутливість матеріалу до впливу водню в елементах конструкцій виділяються водне-небезпечні зони – області, де має місце контакт водню з металом, причому за таких параметрів (температура, степінь активності водню), коли проявляється зумовлена воднем деградація металу в будь-якому вигляді. При цьому для прогнозування водневої стійкості конструкцій в умовах складного багаторежимного термосилового навантаження важливо знати не тільки несприятливе поєднання вказаних факторів, яке може бути досягнуте за весь розрахунковий період, але й закономірності зміни їх у часі.

Вихідні дані повинні містити також інформацію про існуючі у конструкції дефекти: їх місцезнаходження, форму, розміри і т.п. Ці параметри визначаються в залежності від можливості виявлення існуючими засобами контролю або на основі даних про типові дефекти.

При розрахунках необхідно враховувати, що в конструкції можуть бути також невиявлені при контролі дефекти. При цьому, як правило, вважають, що конструкція містить найбільш небезпечний тип дефекту – тріщину, що розташована у воднебезпечній зоні з найбільш несприятливою орієнтацією відносно діючих напружень, властивостей матеріалів та інших факторів.

Отримані на першому етапі дані складають основу розрахункової схеми, за якою визначення міцності та залишкового ресурсу конструкції зводиться до розв'язку деякої модельної задачі або декількох таких задач про гранично-рівноважний стан і кінетику розвитку вихідного дефекту в досліджуваному конструктивному елементі при заданих умовах його навантаження.

Другий етап полягає у визначенні зміни температурного поля, моделюванні і дослідженні накопичення та перерозподілу водню в металі в найбільш небезпечних перерізах конструкції на кожному режимі експлуатації. Зумовлено це необхідністю аналізу виникнення зон в елементах конструкцій, що перенасичені воднем і небезпечні з точки зору можливості водневих пошкоджень (тріщин). Такі дослідження повинні включати послідовний розв'язок задач теплопровідності, а потім дифузії водню за відповідних умов.

На третьому етапі необхідно дослідити НДС в околі дефекту і визначити розрахункові параметри, що контролюють цей стан: КІН, розкриття тріщини та ін. Такі задачі, особливо в тривимірній постановці, досить складні в математичному плані. Так, замкнений розв'язок для визначення δ -розкриття вершини тріщини вдалося отримати лише для найбільш простих конфігурацій тріщин у необмежених тілах [1, 2]. Значно більший розвиток отримали методи визначення КІН. Найбільш повний огляд результатів у цьому напрямку представлено в [3].

Наступний, четвертий етап полягає в експериментальному дослідженні характеристик тріщиностійкості матеріалу у середовищі водню. У механіці руйнування розроблено достатньо методів для реалізації цього етапу.

Нехай l_i – характерний лінійний розмір початкового дефекту, визначений дефектоскопічними засобами, і для нього встановлено величину КІН.

Тоді на основі даних про тріщиностійкість матеріалу визначають граничні розміри тріщини [2], а саме:

граничний розмір l_0 тріщини, що не росте за експлуатаційного навантаження, тобто виконується умова $K_I(l_0) = K_{Ith}^{(H)}$;

критичний розмір тріщини l_c , з якого починається катастрофічний її розвиток, тобто виконується умова $K_I(l_c) = K_{Ic}$.

Тріщини, розмір яких l_i знаходиться в інтервалі $l_0 < l_i < l_c$, за заданих умов експлуатації можуть рости. Ріст такої тріщини визначає залишковий ресурс елемента конструкції, який оцінюється з розв'язку рівняння

$$\frac{dl}{dt} = v(K_I, C_H), \quad (1)$$

де v – швидкість росту тріщини.

Отже, п'ятий етап полягає у дослідженні кінетики руйнування, тобто докритичного підростання тріщин у середовищі водню, і на цій основі визначення залишкового ресурсу конструкції.

Найкраще, звичайно, отримати таку кінетичну діаграму в результаті експериментальних досліджень матеріалів за параметрів взаємодії з воднем, що відтворюють експлуатаційні. Але існуючий об'єм даних про кінетику зумовленого воднем росту тріщин у металах є досить обмежений як і можливості його поповнення. Тому на практиці часто необхідні для розрахунків набори експериментальних характеристик тріщиностійкості або відсутні, або недостатньо повні для заданих діапазонів зміни експлуатаційних впливів. У таких випадках розробляють теоретичні підходи.

Визначення швидкості росту тріщини під дією водню та довготривалого статичного навантаження. Розглянемо пружно-пластичну ізотропну пластину, що містить макротріщину довжиною l і зазнає дії напружень розтягу p і водневмісного середовища, яке створює в околі вершини тріщини концентрацію водню C_S .

Згідно з експериментальними даними [2] макротріщина в середовищі водню росте стрибкоподібно. Середній період $\Delta t = t_*$ циклу формування передумов руйнування – накопичення водню – утворення мікротріщини буде періодом повторення стрибків, за яким разом з їхньою середньою довжиною $\Delta l = x_*$ можна визначити середню макроскопічну швидкість поширення магістральної тріщини:

$$v = \frac{x_*}{t_*}. \quad (2)$$

У роботі [4] для цього випадку на основі енергетичного підходу отримано рівняння балансу швидкостей у вигляді

$$\frac{\partial l}{\partial t} = \frac{B\sigma_0}{\gamma_0 - \gamma_p} \int_0^{l_p} \frac{\partial C_H(x, t)}{\partial t} \Big|_{t=t_*} dx, \quad (3)$$

де l_p – довжина пластичної зони в околі вершини тріщини; γ_p – питома енергія пластичних деформацій при статичному навантаженні, $\gamma_p = \sigma_0 \delta$; δ – розкриття вершини тріщини при навантаженні; σ_0 – усереднені нормальні напруження, що виникають у зоні передруйнування згідно з відомою [2] δ_c -моделлю квазікрихкого руйнування матеріалу з тріщиною.

Питома енергія руйнування представимо у вигляді $\gamma_0 = \sigma_0 \delta_c$, де δ_c – критичне розкриття вершини тріщини.

У результаті отримаємо рівняння для визначення швидкості росту тріщини в середовищі водню:

$$\frac{\partial l}{\partial t} = \frac{B}{\delta_c - \delta} \int_0^{l_p} \frac{\partial C_H(x, t)}{\partial t} \Big|_{t=t_*} dx. \quad (4)$$

Концентрацію водню в зоні передруйнування згідно з [2] визначаємо зі співвідношення

$$C(x, t) = \frac{2C_S \sqrt{\tau} \exp[2m\xi - (4\tau)^{-1}\xi^2]}{\xi\sqrt{\pi} \exp m\xi + 2\sqrt{\tau} \exp(-0,25\xi^2\tau^{-1})}, \quad (5)$$

де $\xi = x(2\delta)^{-1}$; $\tau = Dt/(2\delta)^2$; $m = 0,9\sigma_T V_H/RT$; D – коефіцієнт дифузії водню в металі; V_H – парціальний молярний об'єм водню в металі; R – універсальна газова постійна.

Далі необхідно визначити середню довжину x_* стрибка тріщини. Встановлено [5], що найбільш чутливими до впливу водню є деформаційні характеристики. У деяких випадках деформаційні параметри різко зменшуються зі збільшенням концентрації водню в металі. Тому скористаємося деформаційним критерієм міцності для встановлення умов локального руйнування. Припустимо, що за час t_* тріщина підросте на величину x_* , якщо при заданому навантаженні в точці $x = x_*$ буде виконуватися рівність

$$\varepsilon_H(x_*, p) = \varepsilon_c(p) - BC(x_*, t_*), \quad (6)$$

де $\varepsilon_c(p)$ – граничне значення деформації матеріалу при його руйнуванні без впливу водню.

Деформацію в зоні передруйнування як в наводненому, так і ненаводненому матеріалі визначаємо через розкриття вершини тріщини δ , тобто припустимо, що [6]

$$\varepsilon_H(x_*, p) = \frac{\delta}{h}, \quad \varepsilon_c(p) = \frac{\delta_c}{h}, \quad (7)$$

де h – деякий коефіцієнт пропорційності.

Тоді з врахуванням (2), (5)–(7) отримаємо умову для визначення x_* :

$$1 - \delta/\delta_c = \alpha C(x_*, x_*/v), \quad (8)$$

де $\alpha = Bh/\delta_c$.

Після певних математичних перетворень із (5), (8) отримаємо співвідношення для визначення довжини елементарного стрибка тріщини:

$$x_* \approx \frac{8\alpha C_S D \delta_c \lambda (1-\lambda) + 4D\alpha^2 C_S^2 \delta_c \lambda + 4D\delta_c \lambda (1-\lambda)^2}{8\alpha^2 C_S^2 D m + 8\alpha C_S D m (1-\lambda) + \delta_c \lambda \pi v (1-\lambda)^2}, \quad \lambda = \frac{\delta}{\delta_c}. \quad (9)$$

Далі з врахуванням (2), (4), (5) і (9) запишемо рівняння для визначення швидкості росту тріщини:

$$v = \left[8B\alpha C_S^2 D m \delta_c \lambda (\alpha C_S + (1-\lambda)) \left(\exp\left(\frac{ml_p}{\delta_c \lambda}\right) - 1 \right) - 8D\delta_c \lambda m (1-\lambda) (2\alpha C_S (1-\lambda) + (1-\lambda)^2 + \alpha^2 C_S^2) \right] \times \left[32\alpha C_S m^2 a \delta_c \lambda (1-\lambda) (\alpha C_S + (1-\lambda)) - BC_S \delta_c^2 \lambda^2 \pi (1-\lambda)^2 \left(\exp\left(\frac{ml_p}{\delta_c \lambda}\right) - 1 \right) \right]^{-1}. \quad (10)$$

Для визначення залишкового ресурсу елемента конструкції до рівнянь (1), (10) додамо наступні початкову і кінцеву умови:

$$t = 0, \quad l(0) = l_0; \quad (11)$$

$$t = t_*, \quad l(t_*) = l_*, \quad (12)$$

де критичну довжину $l = l_*$ визначаємо з умови $K_I(l_*) = K_{Ic}$.

Отже, за відомих характеристик матеріалу δ_c , α , B , D , C_S , m тривалість докритичного підростання тріщин у середовищі водню визначають на основі співвідношень (1), (10)–(12).

Розрахунок залишкової довговічності елементів водневого двигуна в середовищі водню. Розглянемо циліндричну деталь двигуна на водневому паливі, всередині якого міститься під тиском водень. Взаємодія цієї конструкції з прилягаючими до неї вузлами еквівалентна прикладанню в торцевих перерізах згинального моменту M разом з осьовим P і поперечним S зусиллями (рис. 1). Очевидною воднебезпечною зоною в деталі буде найбільш несприятлива область розташування концентратора напружень – кільцевої проточки. Умови експлуатації: $T = 350$ К, $P_{H_2} = 30$ МПа. Матеріал конструкції – високоміцна сталь, для якої відома діаграма статичної тріщиностійкості (рис. 2).

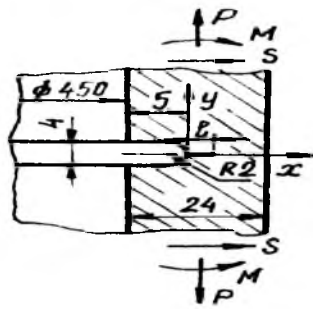


Рис. 1. Фрагмент робочого циліндра двигуна на водневому паливі.

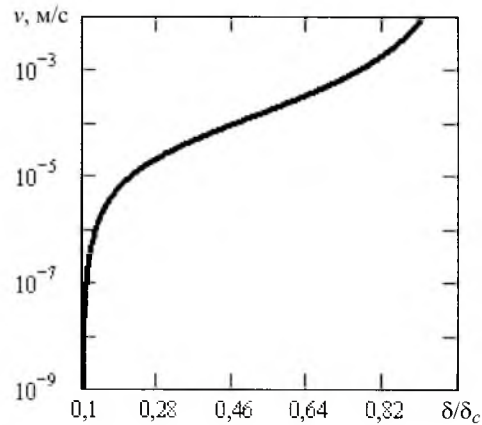


Рис. 2. Залежність швидкості росту тріщини від її розкриття.

Механічні характеристики сталі для температур експлуатації за відсутності водню: $E = 186,4$ ГПа; $\sigma_T = 953$ МПа; $\sigma_B = 993$ МПа; $\psi = 0,66$; $K_{Ic} = 130$ МПа $\sqrt{м}$.

Розрахунок на міцність із врахуванням впливу водню на матеріал проводився після визначення НДС в елементі, який вважається відомим і показує, що найбільш небезпечними будуть тріщини в мінімальному перерізі (на рис. 1 у площині $y = 0$).

Для таких тріщин на основі скінченноелементного розв'язку задачі про НДС у тілі з врахуванням тиску проникаючого в них газу отримано наближену формулу для КІН [7]:

$$K_I = \sqrt{\pi l}(A_0 + A_1 l + A_2 l^2) \quad (0 \leq l \leq 7 \text{ мм}), \quad (13)$$

де l – глибина тріщини, що вимірюється від дна концентратора; $A_0 = 986$ МПа; $A_1 = -136$ МПа/м; $A_2 = 59,3$ МПа/м².

Наведені дані можуть слугувати вхідною інформацією для розрахунку на міцність у середовищі водню. Далі за допомогою співвідношення (10) знайдемо розрахункову діаграму статичної тріщиностійкості даної сталі в робочих умовах, де $\delta_c = 5,409 \cdot 10^{-5}$ м; $D = 9 \cdot 10^{-10}$ м²/с; $m = 0,5969$; $BC_S = 13,099$; $\alpha C_S = 0,3845$; $K_{Ith}^{(H)} = 40$ МПа $\sqrt{м}$.

Після цього методом Рунге-Кутта розв'язуємо рівняння (1) з урахуванням (10) за початкової ($t = 0$, $l = l_0(K_I(l_0) = K_{Ith}^{(H)})$) і кінцевої ($t = t_d$, $l = l_c(K_I(l_c) = K_{Ic})$) умов.

У результаті проведеного розрахунку відмітимо наступне. Хоча елемент, що розглядається, втрачає несучу здатність за наявності в ньому тріщини глибиною більше $l_c(K_{Ic}) = 5,7$ мм, але під впливом середовища водню і експлуатаційних параметрів не поширюватимуться лише тріщини розміром менше 0,64 мм (рис. 3). Як бачимо, конструкція досить міцна за звичайних умов під впливом водню може стати непрацездатною.

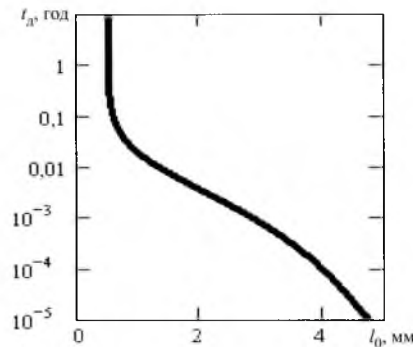


Рис. 3. Діаграма довговічності циліндричної деталі двигуна на водневому паливі.

Оцінка залишкового ресурсу реактора гідрокрекінгу нафти. Дана методика використовувалася при дослідженнях працездатності та оцінки ресурсу реактора гідрокрекінгу нафти. Корпус реактора виготовлено з феритної сталі 2,25Cr-1Mo товщиною 0,19 м, що має такий хімічний склад, мас. %: 0,14C; 0,50Mn; 0,007P; 0,006S; 0,04Si; 2,43Cr; 1,01Mo; 0,16Ni; 0,06Cu. Корпус має захисну наплавку з нержавіючої аустенітної сталі товщиною 0,008 м. Після тривалої роботи в умовах високотемпературного наводнювання реактора при тиску середовища у ньому 16 МПа за температури 723 К процес зупиняється, тобто тиск спадає і має місце охолодження до кімнатної температури.

Встановлено, що найбільш небезпечними можуть бути перехідні теплові режими, під час яких всередині стінки корпусу реактора виникають і приховано розвиваються водневі пошкодження (рис. 4) [8]. Для таких дефектів маємо $K_I = 2P\sqrt{l/\pi}$. Виникли дефекти внаслідок перенасичення металу воднем при дії нестационарних неоднорідних температурних полів, які породжують неоднорідні зміни розчинності водню у металі, та створення надрівноважних тисків у внутрішніх дефектах (рис. 5).

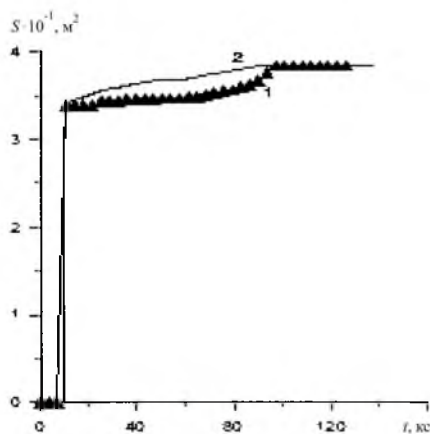


Рис. 4. Часова зміна площі внутрішньої тріщини у біметалевій стінці корпусу реактора: 1 – експеримент; 2 – розрахунок.

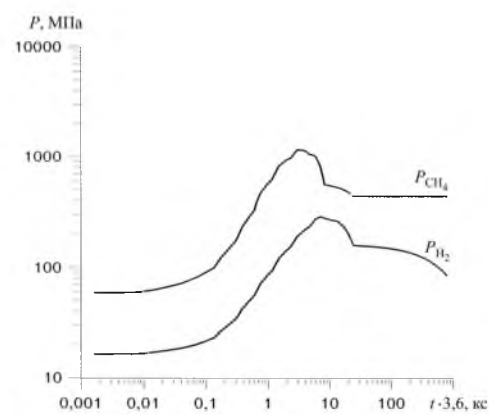


Рис. 5. Розрахункова часова зміна тиску газів у внутрішньому дефекті.

Величина такого перенасичення та внутрішнього тиску залежить від швидкості теплових процесів, характеристик абсорбції водню металами та розмірів областей, що відрізняються розчинностями водню. Всі ці чинники необхідно враховувати як при проектуванні і розрахунках на міцність і довговічність, так і при встановленні допустимих режимів роботи реакторів.

У роботі [9] експериментально побудовано діаграму статичної тріщиностійкості сталі 2,25Cr–1Mo за наступних умов експлуатації: $T = 450^\circ\text{C}$; $P_{\text{H}_2} = 16 \text{ МПа}$ (рис. 6). За допомогою співвідношення (10) знайдено розрахункову залежність швидкості росту тріщини від її розкриття (рис. 6), де $\delta_c = 2,069 \cdot 10^{-4} \text{ м}$; $D = 2 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$; $m = 0,2335$; $\sigma_T = 426 \text{ МПа}$; $K_{Ic} = 170 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$; $BC_S = 1,5197$; $\alpha C_S = 4,1667$. Аналогічно попередньому прикладу методом Рунге-Кутта розв'язуємо рівняння (1) з урахуванням (10) за початкової ($t = 0$, $l = l_0(K_I(l_0) = K_{Ic}^{(H)})$) і кінцевої ($t = t_d$, $l = l_c(K_I(l_c) = K_{Ic})$) умов та отримуємо залежність часу докритичного підростання тріщини від її початкового розміру (рис. 7).

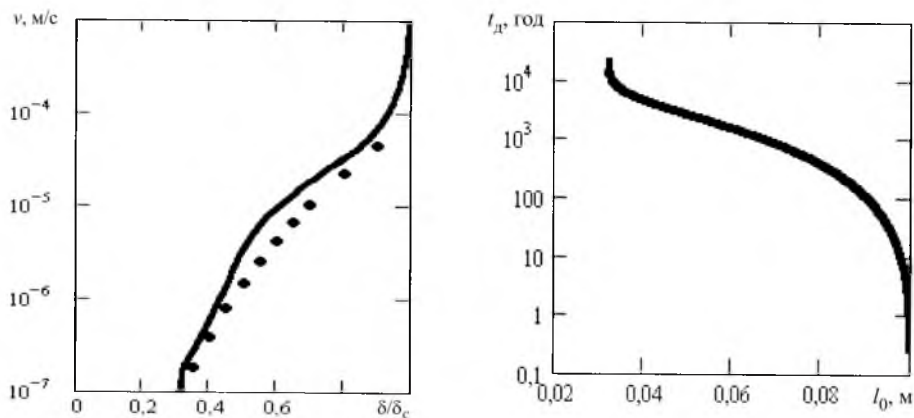


Рис. 6. Діаграма статичної тріщиностійкості сталі 2,25Cr–1Mo: суцільна лінія – розрахункові дані за (10); точки – експериментальні [9].

Рис. 7. Діаграма довговічності елемента реактора гідрокрекінгу нафти з тріщиною.

Отже, запропонована розрахункова модель дає можливість визначати кінетику тріщини в середовищі водню, залишковий ресурс працюючих у водні елементів конструкцій, допустимі розміри виявлених дефектів із точки зору їх водневого руйнування і заданого ресурсу.

Роботу виконано за підтримки Українського науково-технологічного центру (грант 1628).

Резюме

Предложен алгоритм для определения остаточного ресурса элементов конструкций с трещинами (водородный двигатель и реактор гидрокрекинга нефти) при одновременном воздействии на них водородсодержащей среды и длительной механической нагрузки.

1. Андрейків А. Е. Пространственные задачи теории трещин. – Киев: Наук. думка, 1982. – 245 с.
2. Панасюк В. В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. – Киев: Наук. думка, 1991. – 416 с.
3. Саврук М. П. Механика разрушения и прочность материалов. Справочное пособие: В 4 т. – Киев: Наук. думка, 1988. – Т. 2. – 620 с.
4. Гембара О. Розрахункова модель зумовленого воднем росту тріщин у металах // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій / Під заг. ред. В. В. Панасюка – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2004. – С. 551 – 556.
5. McMeeking R. M. N. Finite deformation analysis of crack tip opening in elastic-plastic materials and implication for fracture // J. Mech. Phys. Solids. – 1977. – **25**, No 5. – P. 357 – 381.
6. Андрейків О. Є., Іваницький Я. Л., Терлецька З. О., Кім М. Б. Оцінка довговічності труби нафтогону з поверхневою тріщиною під двовісним блочним навантаженням // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – № 3. – С. 103 – 108.
7. Андрейків А. Е., Панасюк В. В., Поляков Л. И., Харин В. С. Механика водородного охрупчивания металлов и расчет элементов конструкций на прочность. – Львов, 1987. – 54 с. – (Препр. / АН УССР. Физ.-мех. ин-т; № 133).
8. Андрейків О. Є., Гембара О. В. Розрахунок ресурсу елементів реактора гідрокрекінгу нафти // Машинознавство. – 1998. – № 4/5. – С. 5 – 8.
9. Iwadata T., Nomura T., and Watanabe J. Hydrogen effect on remaining life of hydroprocessing reactors // Corrosion. – 1998. – No 2. – P. 103 – 112.

Поступила 24. 03. 2005