

УДК 620.191.33:620.193

РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ ДОКРИТИЧНОГО РОСТУ КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНИХ ТРІЩИН У МЕТАЛЕВИХ ПЛАСТИНАХ

А. О. САКАРА¹, Ю. В. БАНАХЕВИЧ²

¹ Одеський національний морський університет;

² Управління експлуатації магістральних газопроводів і ГРС ДК "Укртрансгаз", Київ

Побудована розрахункова модель для визначення періоду докритичного росту корозійно-механічної тріщини в металевому матеріалі. В основу моделі покладено деформаційний підхід, а також основні положення механіки руйнування. Розглянуто випадок, коли середовище кисле, а під час його контакту з поверхнею металу протікає електрохімічна реакція з водневою деполяризацією. Вважали, що матеріал руйнуватиметься під час реалізації таких двох основних механізмів: воднево-механічне руйнування і анодне розчинення металу. Тому швидкість поширення корозійно-механічної тріщини подано як суму двох складників: швидкості анодного розчинення матеріалу і швидкості його воднево-механічного руйнування. На основі цього, а також відомих у літературі результатів математичного опису електрохімічних реакцій і деяких положень механіки руйнування отримано рівняння для опису кінетики поширення корозійно-механічних тріщин. Це рівняння разом з початковими і кінцевими умовами і складає математичну модель для визначення періоду докритичного росту корозійно-механічних тріщин у металах. Коректність отриманих аналітичних результатів підтверджена відомими в літературі експериментальними даними.

Ключові слова: деформаційний підхід, період докритичного росту тріщини, корозійно-механічна тріщина, математична модель, воднево-механічна тріщина, анодне розчинення металу, електрохімічна реакція, воднева деполяризація, кисле середовище.

Для врахування дії водневовмісних і корозійно-агресивних середовищ на ресурс (залишковий ресурс) металевих елементів конструкцій довготривалої експлуатації необхідно створити кількісну теорію, щоб описати руйнування матеріалів в цих умовах. Відомо [1–10] низку спроб створення такої теорії, але вони здебільш базувалися на прикладах опису тільки конкретних експериментальних даних. На основі цих результатів можна визначати ресурс лише деяких елементів конструкцій.

Нижче зроблено спробу створити таку теорію на основі деформаційного підходу для опису сповільненого руйнування металевих матеріалів в умовах дії механічних навантажень, а також водневовмісних і корозійно-агресивних середовищ. В основу підходу покладено розрахункову модель, суть якої ось у чому.

Моделювання корозійних процесів біля вершини тріщини. Розглянемо випадок, коли металева пластина з тріщиною завдовжки l (рис. 1) розтягується довготривалими зусиллями p . Вважаємо, що напружено-деформований стан у пластині симетричний відносно лінії розміщення тріщини. Така пластина міститься в корозивно-активному середовищі з певним рН, яке попадає в середину тріщини. При цьому припускаємо [6, 10], що кінетика наводнення металу в зоні передруйнування залежить від параметрів напружено-де-

формованого стану в околі вершини тріщини та інтенсивності нестационарного потоку водню $J(t)$ з поверхні поділу метал–середовище в метал. Зміна $J(t)$ обумовлена електрохімічними процесами біля вершини тріщини. Отже, очевидно є необхідність побудови електрохімічної моделі протікання корозії під напруженням у тріщині, яка дозволила б визначити інтенсивність нестационарного потоку водню в метал як функцію таких параметрів: концентрації іонів у електроліті, навантаження, стандартного електродного потенціалу металу.

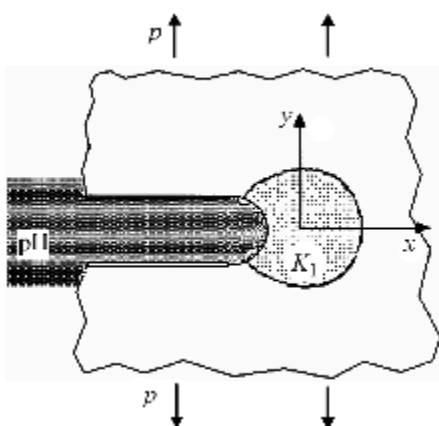


Рис. 1. Схема навантаження тіла з тріщиною і дією корозивного середовища.

Fig. 1. Loading scheme of a body with a crack and under action of corrosive environment.

Тріщина під напруженням у корозивно-активному середовищі розвивається в умовах періодичної появи біля її вершини свіжоутвореної поверхні (СУП), вільної від пасивувального шару і активованої напруженнями [10]. Виникнення цієї поверхні є початком функціонування гальванопари СУП (анод)–поверхня стінок тріщини (катод), вкритої пасивувальним шаром. Водночас вихідна гетерогенність свіжої поверхні та ініційоване нею утворення острівців пасивувального шару призводять до нерівномірного розподілу потенціалу, а отже, перебігу і анодних, і катодних реакцій у межах СУП. В умовах електрохімічної корозії водень проникає в метал під час катодного процесу [11, 12]. Оскільки його дифузія зі значних віддалей достатньо повільна, то зона передруйнування на-

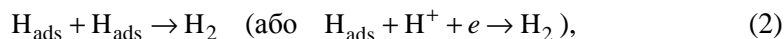
воднюється, в основному, через поверхню локальних катодних зон.

Під час пасивації різних систем метал–середовище на металі можливе формування або щільної плівки з високими корозійно-захисними характеристиками, або високодисперсної колоїдної суміші гідратів, або пористої плівки, яка лише уповільнює корозію. Локалізація катодних і анодних зон у кожному випадку буде інша [13]. Отже, для визначення кінетики наводнювання зони передруйнування необхідно враховувати тип пасивувального шару і закономірності його утворення, чого не відтворюють існуючі моделі [6]. Вони також не беруть до уваги експериментальні дані [6, 10], які свідчать, що електрохімічні реакції між вершиною тріщини і її берегами протікають переважно на відстанях, сумірних із розкриттям у вершині тріщини.

Тут зроблено спробу побудувати вільну від цих недоліків модель електрохімічних процесів у вершині навантаженої тріщини для системи метал–середовище, під час взаємодії яких утворюється плівка з корозійно-захисними властивостями.

В основу моделі покладено таке. Анодний процес відбувається тільки в межах СУП. Конкуруючими анодними реакціями є розчинення металу і виникнення пасивувальної плівки (ПП). Гетерогенність ініціює утворення в сприятливих місцях ізольованих острівців плівки і зростання їх ширини і товщини [6]. У момент виникнення свіжої поверхні катодний процес локалізується на прилеглий до СУП ділянці стінок тріщини, площа якої сумірна з площею СУП.

Надалі, в міру пасивації СУП, острівці ПП стають локальними катодними зонами. Катодний процес складається з таких послідовних реакцій [6, 10]:



Реакція (2), що зумовлює утворення пухирців газоподібного водню, конкурує з реакцією (3) переходу водню з адсорбованого H_{ads} на поверхні в абсорбований H_{abs} стан (рис. 2). Остання спричиняє на поверхні металу концентрацію водню $C_0(t)$, яку в першому наближенні визначають так [14]:

$$C_0(t) = B\sqrt[4]{it}, \quad (4)$$

де B – константа системи метал–середовище, яку розраховують із експерименту; i – густина катодного струму на острівцях ПП. Оскільки відомо [6, 10], що корозійна тріщина за відносно великі часи t_* поширюється стрибками малої довжини x_m , то можна прийняти, що співвідношення (4) визначає максимальну концентрацію водню в зоні переддруйнування біля вершини тріщини. При цьому вважаємо, що переважальним катодним процесом в околі СУП є воднева деполяризація, параметри якої відомо [11–13]. Використовуючи результати праці [15], співвідношення (4) можемо записати так:

$$C_0(t) = B\{ti_{\text{max}}[1 + k_1R_0^{-1}i_{\text{max}}(1 - \exp(-\xi mtF^{-1}))]^{-1}\}^{0,25}. \quad (5)$$

Тут F – число Фарадея; m – грам-еквівалентна вага металу; i_{max} – значення анодного струму i в початковий момент, коли поверхня вершини тріщини ще чиста; R_0 – омичний опір середовища; k_1, ξ – сталі, які залежать від рН середовища і які визначають експериментально [15].

Побудова математичної моделі росту корозійно-механічної тріщини.

Для визначення ресурсу елементів конструкцій, що працюють у корозивних водневомісних середовищах, необхідно встановити залежність швидкості росту тріщини від параметрів пружно-пластичної і електрохімічної ситуацій у її вершині. Для цього треба знайти розподіл концентрації водню C_H у зоні переддруйнування біля вершини рухомої тріщини. Використовуючи це та гіпотезу про двоетапність росту в умовах сумісної дії статичних напружень і водневомісного середовища, а також застосовуючи деформаційний критерій [10], встановимо функціональне співвідношення для визначення швидкості росту корозійної тріщини.

Розвиток тріщини під дією напружень і водневомісного корозивного середовища – це безперервне чергування двох взаємозв'язаних стадій: електрохімічної, тривалої в часі, і стрибкоподібного поширення тріщини. Впродовж першої тріщина поглиблюється внаслідок анодного розчинення на довжину

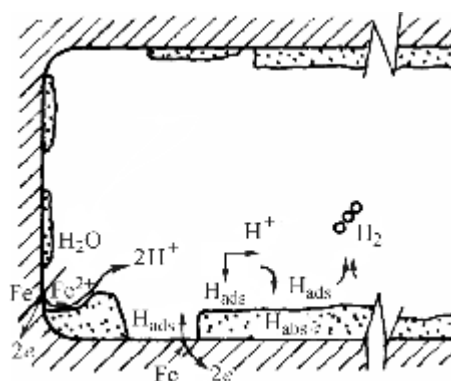


Рис. 2. Схема електрохімічних процесів біля вершини тріщини.

Fig. 2. Scheme of electrochemical processes near the crack tip.

x_a . Ця стадія триває до моменту t_* , коли концентрація водню C_H у зоні передруйнування досягне критичного для даного рівня напруження значення. В момент $t = t_*$ тріщина стрибкоподібно просунеться на величину x_m , що рівна довжині зони, в якій концентрація водню перевищила критичну. Тоді швидкість руху тріщини [7]

$$dl / dt = V = V_a + V_m = (x_a + x_m) / t_* . \quad (6)$$

Згідно з міркуваннями, викладеними в праці [10], довжину механічного стрибка тріщини x_m можна подати наближено так:

$$x_m = \alpha \delta , \quad (7)$$

де δ – розкриття вершини тріщини [9]; α – величина, яку знаходять із експерименту [10]. Величини V_a , V_m обчислюємо з відомих результатів [10]:

$$V_a = Fm^{-1}n^{-1}t_*^{-1} \int_0^1 i(x_m t_*) dx , \quad V_m = x_m t_*^{-1} = \alpha \delta t_*^{-1} , \quad (8)$$

де n – валентність металу, а t_* визначаємо на основі деформаційного критерію [10] із рівняння

$$\delta_C - \delta = AC_H(t_*) . \quad (9)$$

Тут A – експериментальна константа [10]; δ_C – критичне значення δ ; $C_H(t_*)$ – концентрація водню в зоні передруйнування. Вважаючи, що елементарний стрибок корозійної тріщини x_m є достатньо малий, прийmemo, що

$$C_0(t_*) \approx C_H(t_*) . \quad (10)$$

Встановимо тепер кінетику росту корозійної статично навантаженої тріщини, коли виконуються такі умови: під час взаємодії металу з середовищем в околі вершини тріщини переважає воднева деполяризація. Тоді, підставляючи співвідношення (5), (8) і (10) у рівність (9), для визначення механічного складника V_m росту корозійної тріщини отримаємо рівняння

$$\alpha(AB)^4 i_{\max} \delta V_m^{-1} (\delta_C - \delta)^{-4} = 1 + k_1 R_0^{-1} i_{\max} [1 - \exp(-\alpha \delta \xi m V_m^{-1} F^{-1})] . \quad (11)$$

Розв'язуючи його (11) відносно V_m і нехтуючи малі величини другого порядку, отримаємо:

$$V_m = G_1 \delta [(\delta_C - \delta_{SCC})^4 (\delta_C - \delta)^{-4} - 1] , \quad (12)$$

де

$$\delta_{SCC} = \delta_C - AB^4 \sqrt{k_1 \xi m F^{-1}} , \quad G_1 = \alpha \xi m F^{-1} \ln^{-1} (1 + R_0 k_1^{-1} i_{\max}^{-1}) . \quad (13)$$

Величина δ_{SCC} відповідає значенню δ , коли швидкість росту воднево-механічної тріщини V_m дорівнює нулю.

Знайдемо тепер швидкість V_a анодного розчинення у вершині тріщини. Густина i катодного струму на острівцях ПП на поверхні вершини тріщини визначаємо так [15]:

$$i = i_{\max} \{1 + k_1 R_0^{-1} i_{\max} [1 - \exp(-\alpha \delta m V_m^{-1} \xi F^{-1})]\}^{-1} . \quad (14)$$

Підставляємо друге рівняння (8), співвідношення (12) і (14) в першу рівність (8) і для визначення величини V_a отримаємо формулу

$$V_a = G_2 \{1 - G_3 [(\delta_C - \delta_{SCC})^4 (\delta_C - \delta)^{-4} - 1]\} , \quad (15)$$

де $G_2 = i_{\max} F n^{-1} m^{-1} (1 + k_1 i_{\max} R_0^{-1})^{-1}$; $G_3 = G_1 k_1 i_{\max} F (\alpha m R_0 \xi)^{-1} \ln(1 + k_1 i_{\max} R_0^{-1})$.

Сумарну швидкість росту корозійної тріщини знаходимо, підставляючи вирази (12) і (15) у співвідношення (6). В результаті для визначення періоду $t = t_*$ докритичного росту корозійно-механічної тріщини дістанемо диференціальне рівняння

$$dl/dt = G_2 - G_1 \delta + (G_1 \delta - G_2 G_3) (\delta_C - \delta_{SCC})^4 (\delta_C - \delta)^{-4} \quad (16)$$

за початкових і кінцевих умов

$$t = 0, l(0) = l_0; t = t_*, l(t_*) = l_*, \delta(l_*) = \delta_C. \quad (17)$$

Інтегруючи його за умов (17), період докритичного росту обчислимо за формулою

$$t_* = \int_{l_0}^{l_*} [G_2 - G_1 \delta + (G_1 \delta - G_2 G_3) (\delta_C - \delta_{SCC})^4 (\delta_C - \delta)^{-4}]^{-1} dl. \quad (18)$$

Таким чином, якщо будуть встановлені із експерименту константи (характеристики системи матеріал–середовище) $G_1, G_2, G_3, \delta_C, \delta_{SCC}$, то період докритичного росту корозійно-механічної тріщини визначає формула (18).

Її справедливість перевіряли з допомогою експериментальних даних [16] для сталі 45XH2MФА (випробування в дистильованій воді). Для спрощення процедури порівняння вважали, що тріщина макроскопічна (напружено-деформований стан в околі її вершини симетричний і виражений через коефіцієнт інтенсивності напружень K_I [10]) і складник V_a набагато менший від V_m (цей факт підтверджено раніше [10]). Тоді рівняння (16) можна записати в більш спрощеному вигляді:

$$V \approx G_1 K_I^2 E \sigma_0 [(K_C^2 - K_{SCC}^2)^4 (K_C^2 - K_I^2)^{-4} - 1]. \quad (19)$$

Тут K_C – критичне значення K_I ; σ_0 – середнє значення нормальних напружень у зоні передруйнування біля вершини тріщини; K_{SCC} – найбільше значення K_I , за якого тріщина не поширюється, тобто $V = 0$. Невідомі константи $G_1, E, \sigma_0, K_C, K_{SCC}$ визначено за експериментальними діаграмами $V \sim K_I$. Порівняння експериментальної залежності $V-\lambda$ (див. рис. 3, трикутники) з теоретичною (суцільна лінія) дає можливість зробити висновок про задовільний їх збіг і достовірність запропонованого підходу.

Аналог задачі Гріффітса за дії корозивного середовища. Розглянемо нескінченну пластину, яка послаблена прямолінійною тріщиною початкової довжини $2l_0$ і розтягується в нескінченно віддалених точках довготривалими зусиллями інтенсивності p , які перпендикулярні до лінії розміщення тріщини. Вважаємо, що в тріщину попадає корозивно-активне середовище, властивості

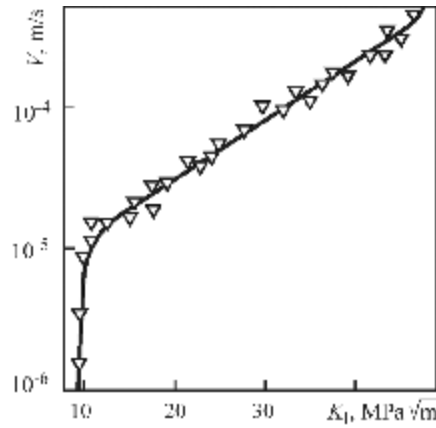


Рис. 3. Порівняння експериментальних і розрахункових даних для залежності $V-K_I$.

Fig. 3. Comparison of experimental and calculation data for dependence $V-K_I$.

якого згадані вище (ріст корозійної тріщини описує рівняння (19)). Задача полягає у визначенні часу $t = t_*$, з досягненням якого тріщина підросте до критичної величини $l(t_*) = l_*$ і пластина зруйнується.

Для розв'язку задачі застосуємо математичну модель (16), (17), яка тут набуде вигляду

$$dl/dt = G_1 K_I^2 E \sigma_0 [(K_C^2 - K_{SCC}^2)^4 (K_C^2 - K_I^2)^{-4} - 1], \quad (20)$$

$$t = 0, l(0) = l_0; t = t_*, l(t_*) = l_*, K_I(l_*) = K_{IC}. \quad (21)$$

Для задачі Гріффітса коефіцієнт інтенсивності напружень [1]

$$K_I = p\sqrt{\pi l}. \quad (22)$$

Інтегруючи рівняння (20) за умов (21), (22), для визначення періоду $t = t_*$ докритичного росту корозійно-механічної тріщини в пластині отримуємо формулу

$$t_* = \frac{(K_C^2 - K_{SCC}^2)^2}{2\pi p^2 G_1} \left\{ \frac{K_{SCC}^{-2}}{2K_C^2 - K_{SCC}^2} \left\langle \ln \frac{\pi l_0 p^2}{K_C^2} + \frac{K_C^2}{2(K_C^2 - K_{SCC}^2)} \ln \frac{2K_C^2 - K_{SCC}^2 - \pi l_0 p^2}{\pi l_0 p^2 - K_{SCC}^2} - \right. \right. \\ \left. \left. - 0,5 \ln \frac{(K_C^2 - K_{SCC}^2)^2 - (K_C^2 - \pi l_0 p^2)^2}{(K_C^2 - K_{SCC}^2)^2} \right\rangle - \left\langle \frac{K_C^2}{K_C^2 - K_{SCC}^2} \operatorname{arctg} \frac{K_C^2 - \pi l_0 p^2}{K_C^2 - K_{SCC}^2} - \ln \frac{\pi l_0 p^2}{K_C^2} + \right. \right. \\ \left. \left. + 0,5 \ln \frac{(K_C^2 - K_{SCC}^2)^2 + (K_C^2 - \pi l_0 p^2)^2}{(K_C^2 - K_{SCC}^2)^2} \right\rangle \left[(K_C^2 - K_{SCC}^2)^2 + K_C^4 \right]^{-1} \right\} - \frac{G_1^{-1}}{\pi p^2} \ln \frac{K_C^2}{\pi l_0 p^2}. \quad (23)$$

Таким чином, якщо експериментально знайдені характеристики G_1 , K_C , K_{SCC} і задані параметри l_0 , p , то залишкову довговічність (період докритичного росту тріщини) пластины можна знайти за формулою (23).

ВИСНОВКИ

На основі деформаційного підходу і деяких положень механіки руйнування побудована розрахункова модель для визначення періоду докритичного росту корозійно-механічної тріщини в металевому матеріалі. Розглянуто випадок, коли середовище кисле, а під час його контакту з поверхнею металу протікає електрохімічна реакція з водневою деполяризацією. Коректність моделі підтверджена відомими в літературі експериментальними даними.

РЕЗЮМЕ. Построена расчетная модель для определения периода докритического роста коррозионно-механической трещины в металлическом материале. В основу модели положен деформационный подход, а также основные положения механики разрушения. Рассмотрен случай, когда среда кислая, а при ее контакте с поверхностью металла происходит электрохимическая реакция с водородной деполяризацией. При этом считали, что материал будет разрушаться при реализации таких двух основных механизмов: водородно-механическое разрушение и анодное растворение металла. Поэтому скорость распространения коррозионно-механической трещины представлено как сумму двух составляющих: скорости анодного растворения материала и скорости его водородно-механического разрушения. На основании этого, а также известных в литературе результатов математического описания электрохимических реакций и некоторых положений механики разрушения получено уравнение для описания кинетики распространения коррозионно-механических трещин. Это уравнение вместе с начальными и конечными условиями и составляет математическую модель для определения периода докритического роста коррозионно-механических трещин в металлах. Корректность полученных аналитических результатов подтверждена известными в литературе экспериментальными данными.

SUMMARY. The calculation model for determination of the period of subcritical corrosive-mechanical crack growth in metallic material is built. The deformation approach and also the main ideas of fracture mechanics are used as a model basis. The case is considered, when the environment is acid and during the contact with the metal surface the electrochemical reaction occurs under hydrogen depolarization. It is thus considered that material fracture will pass according to such two basic mechanisms: hydrogenic-mechanical and anode dissolution of the metal. Therefore, the speed of corrosion-mechanical crack growth is presented as a sum of two constituents: speeds of material anode dissolution and the speed of its hydrogen-mechanical fracture. On this basis and also using the results of mathematical description of electrochemical reactions and some ideas of fracture mechanics, the known in literature equation has been obtained for description of the corrosion-mechanical crack growth kinetics. This equation together with initial and final conditions form a mathematical model for determination of the period of corrosive-mechanical subcritical crack growth in the metallic materials. The correctness of the obtained analytical results is confirmed by the experimental data known in literature.

1. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
2. Похмурский В. И. Коррозионная усталость металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 207 с.
3. Романив О. Н., Никифорчин Г. Н. Механика коррозионного разрушения конструкционных сплавов. – М.: Металлургия, 1986. – 294 с.
4. Дмитрах І. М., Панасюк В. В. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень. – Львів: ФМІ НАНУ, 1999. – 340 с.
5. Петров Л. Н., Сопронюк Н. Г. Коррозионно-механическое разрушение металлов и сплавов. – К.: Наук. думка, 1991. – 214 с.
6. Андрейків О. Є., Тим'як Н. І. Електрохімічна модель локальної корозії у вершині навантаження тріщини // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1994. – № 1. – С. 25–30.
7. Тим'як Н. І., Андрейків А. Е. Визначення швидкості росту тріщин в умовах сумісної дії статичних навантажень і корозійно-активного середовища // Там же. – 1995. – № 2. – С. 68–74.
8. Никифорчин Г. М., Терлецька З. О. Кінетичні рівняння корозійно-втомного руйнування тонких металічних пластин // Доп. НАНУ. – 1994. – № 11. – С. 41–46.
9. Андрейків О. Є. Довговічність металічних матеріалів у водневмісних середовищах // Прогресивні матеріали і технології / Під ред. І. К. Походні. – К.: Наук. думка, 2003. – С. 241–257.
10. Андрейків О. Є., Гембара О. В. Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2008. – 344 с.
11. Кеше Г. Коррозия металлов. Физико-химические принципы и актуальные проблемы. – М.: Металлургия, 1982. – 400 с.
12. Загорчимски Г. Проникновение электролитического водорода в железо и стали и его влияние на механические свойства металлов // Защита металлов. – 1983. – № 5. – С. 733–739.
13. Жук Н. П. Курс коррозии и защиты металлов. – М.: Металлургия, 1966. – 407 с.
14. Гембара О. В., Терлецька З. О., Чепіль О. Я. Концентрація водню біля вершини корозійної тріщини // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – № 1. – С. 109–111.
15. Гембара О. В., Терлецька З. О., Чепіль О. Я. Визначення електричних полів у системі електрод-метал // Там же. – 2007. – № 2. – С. 71–77.
16. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин и др. – К.: Наук. думка, 1990. – 660 с.

Одержано 22.01.2010