

УДК 670.191.33

ЗАСТОСУВАННЯ АДИТИВНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЦИКЛІЧНОГО ВИПАДКОВОГО ПРОЦЕСУ І ДЕТЕРМІНОВАНОЇ ФУНКЦІЇ ТРЕНДУ ДЛЯ АНАЛІЗУ РУЙНУВАННЯ ГАЗОПРОВОДУ

Я. В. ЛИТВИНЕНКО, П. О. МАРУЩАК

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Запропоновано підхід до математичного аналізу тріщиностійкості сталі магістрального газопроводу, який дає змогу кількісно оцінити кінетику динамічного руйнування труби з урахуванням стохастичності та циклічності цього процесу. Він створює можливість для моделювання поширення тріщини в трубі магістрального газопроводу та аналізу окремих етапів її підростання. Особливу увагу приділено достовірності пропонованого підходу на основі порівняння з відомим натурним експериментом.

Ключові слова: *модель, циклічний випадковий процес, динамічне руйнування труби, швидкість поширення тріщини.*

На сьогодні для оцінювання технічного стану металу магістральних нафто- та газопроводів активно використовують традиційні характеристики міцності і пластичності та розвивають методи оцінювання тріщиностійкості [1, 2]. Проте більшість з них не відтворюють реальних умов роботи газопроводу, є, зазвичай, порівняльними або оціночними [3, 4]. Сучасні магістральні нафто- та газопроводи виготовляють зі сталей підвищеної міцності, методики оцінювання тріщиностійкості яких потребують подальшого розвитку і доопрацювання [4, 5].

Найінформативнішими є випробування ділянок труб за умови старту тріщини [6, 7]. Такі експерименти враховують вплив температури, напружено-деформованого стану, кінетику руйнування тощо. Суттєвим недоліком таких випробувань є їх висока вартість [8]. Створення моделей руйнування натурних об'єктів дасть змогу теоретично та експериментально узагальнити результати та запропонувати заходи з можливого запобігання або зниження імовірності аварійного руйнування нафто- та газопроводів.

Відомо, що умови руйнування магістральних газопроводів, методи їх випробування та критерії оцінювання тріщиностійкості трубних сталей мають певні спільні ознаки. Зокрема, їм притаманна значна енергоємність руйнування, яка визначається властивостями трубної сталі. Слід зазначити, що старт тріщини за високих швидкостей її поширення забезпечує крихке руйнування, проте зі збільшенням довжини тріщини та зниженням тиску газу його спричиняють в'язкі властивості матеріалу труби [9, 10].

Зазвичай одиничні випробування труб не дають змоги повністю відтворити умови випробувань вздовж усієї траєкторії підростання тріщини за умов її динамічного поширення. Цього можна досягнути моделюванням та створенням відповідних описів закономірностей росту тріщини. Методика такого опису поширення тріщини має бути фізично коректною та математично обґрунтованою.

Експериментальні дослідження динамічного руйнування магістральних нафто- та газопроводів дають змогу встановити основні закономірності деформаційних процесів у сталях різних класів міцності за високих швидкостей поширення

тріщини [11, 12]. Проте на сьогодні ще не створено єдиного стандарту, який би враховував основні ефекти, які є визначальними для опису пружно-пластичних властивостей та динамічної міцності матеріалів за ударних навантажень.

Саме тому математичний опис динамічного деформування та руйнування, оцінювання кінетики поширення дефектів у магістральних газопроводах активно розвивають для створення простих та дієвих моделей, які дозволять фізично коректно та достатньо просто описати ці складні явища [13, 14]. Особливу увагу приділяють вибору або створенню ефективних числових методів та алгоритмів їх оптимізації для забезпечення достовірності обчислень.

Пропонований підхід дасть змогу встановити фізичний зв'язок пружно-пластичного руйнування труби з коливаннями швидкості на різних відстанях від місця старту тріщини динамічного руйнування. Розвиток таких методів моделювання кінетики поширення тріщини в трубі є основою для створення нових технологічних підходів виготовлення труб підвищеної міцності із збереженням високої в'язкості матеріалу [15, 16].

Мета роботи – використати адитивну математичну модель у вигляді циклічного випадкового процесу та детерміновану функцію тренду для опису динамічного руйнування труби магістрального газопроводу з урахуванням стохастичності та циклічності цього явища.

Фізико-механічні закономірності динамічного руйнування магістрального газопроводу. Сучасні методи тензометрії дають можливість записувати швидкість поширення тріщини за натурального випробування труби, що є передумовою поглибленого аналізу її кінетики. Проте залишається актуальним створення ефективних комп'ютерних систем автоматизованої обробки одержаних сигналів з формуванням попереднього фізико-механічного висновку про закономірності руйнування об'єкта. Отже, розвиток моделювання кінетики динамічного поширення тріщини в трубі є основою для створення труб підвищеної міцності зі збереженням високої в'язкості матеріалу [12, 13]. Розглянемо схему руйнування ділянки магістрального газопроводу (рис. 1).

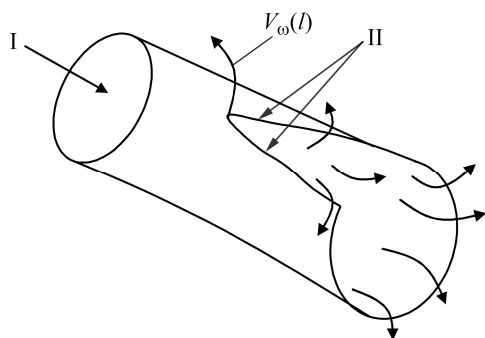


Рис. 1. Схема руйнування ділянки магістрального газопроводу [4, 8]:

I – напрям подачі газу;
II – розрив стінки труби.

Fig. 1. Scheme of failure of the section of the main gas pipeline [4, 8]:

I – gas flow;
II – crack movement.

Такі моделі є основою для створення методів гальмування тріщин шляхом забезпечення на певному етапі їх поширення умов, за яких рушійне просування тріщини дорівнюватиме опору руйнування матеріалу. Водночас, як і для інших складних явищ, ідентифікація параметрів та обґрунтування достовірності пропозованих моделей спричиняють певні труднощі під час математичного опису цих процесів. Нижче описана кінетика поширення тріщини за динамічного руйнування магістрального газопроводу на основі детальнішого урахування коливань швидкості, зумовлених гілкуванням вершини тріщини вздовж тіла труби.

Опис кінетики поширення тріщини функцією тренду. Особливістю пропонованого підходу є інтерпретація та модельний опис закономірностей динамічного руйнування труби з урахуванням релаксаційних механізмів у вершині тріщини, зумовлених нелінійною поведінкою магістрального дефекту, структурно-

механічною релаксацією, непружним деформуванням та пластичним течінням. Алгоритм запропонованого підходу у загальному вигляді подано на рис. 2.

Рис. 2. Алгоритм застосування адитивної математичної моделі циклічного випадкового процесу і детермінованої функції тренду для визначення характеристик руйнування труби магістрального газопроводу: 1 – ввід даних; 2 – визначення тренду (опис поліномом 3-го порядку); 3 – визначення тренду (опис експоненціальною функцією); 4 – усунення тренду; 5 – сегментація циклічної компоненти; 6 – статистична обробка циклічної компоненти; 7 – моделювання поширення тріщини; 8 – оцінка похибок моделювання; A – початок; B – кінець.

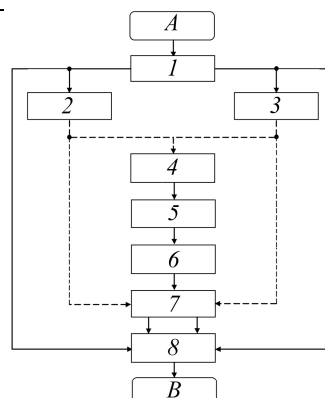


Fig. 2. Algorithm of the application of the additive mathematical model of the cyclic random process and the deterministic trend function for determining the characteristics of fracture of the main gas pipeline pipe: 1 – data input; 2 – determination of the trend (description of the polynomial of the 3rd order); 3 – determination of the trend (description of the exponential function); 4 – elimination of the trend; 5 – segmentation of cyclic component; 6 – statistical processing of cyclic component; 7 – simulation of the crack propagation process; 8 – estimation of modelling errors; A – the beginning; B – the end.

На рис. 3 показано експериментальні результати, описані детермінованою функцією тренду. Пропонований підхід полягає у використанні адитивної математичної моделі у вигляді [17]

$$V(\omega, l) = f(l) + \xi(\omega, l), \quad \omega \in \Omega, \quad l \in \mathbf{R}, \quad (1)$$

де $\xi(\omega, l)$ – циклічний випадковий процес як модель циклічної компоненти сигналу; $f(l)$ – детермінована функція, що відображає тренд руйнування труби.

Розглянемо два підходи для опису функції тренду.

Вибір експоненти як функції тренду. Розглядали кілька стадій руйнування труби магістрального газопроводу: утворення первинної тріщини та її старт – стрімке поширення тріщини під впливом внутрішнього тиску у трубі; ріст тріщини, за якого збільшується її довжина та знижується швидкість поширення внаслідок зміни напружено-деформованого стану; стабілізація швидкості поширення тріщини внаслідок самоорганізації руйнування матеріалу труби; втрата тривкості та кінцеве руйнування труби.

Криву можна умовно розділити на дві ділянки. На першій (l_{stab}) швидкість зменшується від деякого максимального значення V_{max} і виходить на плато (стабілізується) до значення V_{stab} . Можна припустити, що вона змінюється за експоненціальною закономірністю, яку найкраще описує функція

$$f(l) = V_{\text{stab}} + (V_{\text{max}} - V_{\text{stab}}) \cdot e^{-lt}, \quad (2)$$

де максимальна швидкість $V_{\text{max}} = 400$ m/s, а стабілізована – $V_{\text{stab}} = 200$ m/s; $t = 50$ – коефіцієнт, що регулює кривизну функції. Функція (2) достатньо точно описує експериментальні результати, але при $l \rightarrow 0$ швидкість прямує до нескінченності.

Друга ділянка передувє повній зупинці тріщини. Її можна описати лінійною функцією, яка зменшується від точки з координатами ($l_{\text{stab}}, V_{\text{stab}}$) до нуля (рис. 3a).

Вибір полінома як функції тренду. Оскільки опис динамічного руйнування труби має бути з одного боку фізично обґрунтованим, а з іншого забезпечувати прийнятну точність та коректність, зробили припущення про можливість опису всіх вказаних ділянок руйнування труби єдиною степеневою залежністю (рис. 3b,

d). Це дає змогу забезпечити ще й достатню простоту обчислень та уникнути визначення значної кількості параметрів. Слід підкреслити, що таке спрощення є вимушеним кроком, до якого спонукає складність макро- та мікромеханізмів динамічного руйнування труби:

$$f(l) = \sum_{n=0}^3 c_n \cdot l^n, \quad l \in \mathbf{R}, \quad (3)$$

де c_n – коефіцієнт поліноміальної функції (3), $n = \overline{0,3}$.

Функція (3) описує експериментальні результати на всій довжині аналізованого сигналу (рис. 3b).

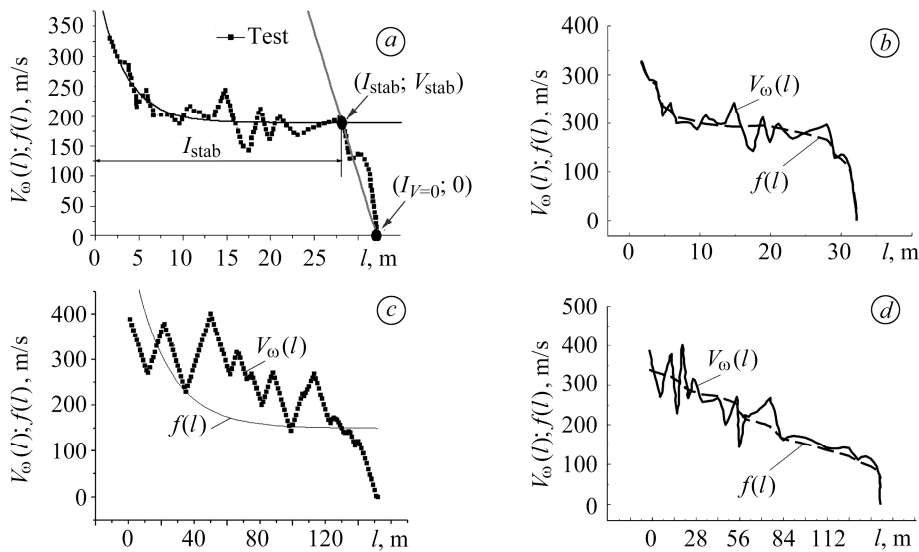


Рис. 3. Експериментальна залежність швидкості росту тріщини від довжини підростання [3, 4] та її апроксимація: *a, c* – опис експонентою; *b, d* – опис поліномом ($a - V_{\max} = 433,18 \text{ m/s}$; $V_{\text{stab}} = 188,46 \text{ m/s}$; $t = 3,19$; $c - V_{\max} = 556,41 \text{ m/s}$; $V_{\text{stab}} = 150,41 \text{ m/s}$; $t = 21,41$).

Fig. 3. Experimental dependence of the crack growth rate on the distance of its propagation [3, 4] and its approximation: *a, c* – description of the exponent; *b, d* – description of polynomial ($a - V_{\max} = 433.18 \text{ m/s}$; $V_{\text{stab}} = 188.46 \text{ m/s}$; $t = 3.19$; $c - V_{\max} = 556.41 \text{ m/s}$; $V_{\text{stab}} = 150.41 \text{ m/s}$; $t = 21.41$).

Підхід до аналізу та моделювання динамічного поширення тріщини. Для опису кінетики динамічного поширення тріщини в трубі газопроводу застосували адитивну модель – суму функції тренду (поліном або експонента) та циклічного випадкового процесу. Це дозволило обґрунтовано застосувати методи статистичного опрацювання кінетики поширення тріщини в трубі газопроводу для її аналізу, моделювання та можливого подальшого прогнозування [18]. На першому етапі обробки залежності “швидкість динамічного поширення тріщини–довжина руйнування” як вихідні дані взяли експериментальні результати [6, 7] руйнування магістрального газопроводу, виготовленого зі сталі класу міцності X100. З них виділили трендову $\{f(l), l \in \mathbf{R}\}$ та циклічну $\{\xi(\omega, l), \omega \in \mathbf{\Omega}, l \in \mathbf{R}\}$ компоненти. Ця процедура полягала в описі результатів детермінованою функцією і знаходження відповідних коефіцієнтів полінома (3) чи функції експоненти (2).

Циклічну компоненту визначали шляхом віднімання функції тренду $\{f(l), l \in \mathbf{R}\}$ від сигналу вхідного процесу $V(\omega, l)$, а саме:

$$\xi(\omega, l) = V(\omega, l) - f(l), \quad \omega \in \Omega, l \in \mathbf{R}. \quad (4)$$

Окремі результати статистичної обробки даних руйнування магістрального газопроводу. $V_\omega(l)$ – вхідна реалізація досліджуваної швидкості росту тріщини, $\xi_\omega(l)$ – реалізація її циклічної компоненти. Для аналізу цієї компоненти необхідно застосувати методи сегментації [19], визначити дискретну функцію ритму, виконати її інтерполяцію [19, 20] і використати отримані результати для застосування методів статистичного оцінювання [11]. Під функцією ритму розуміли зміну часових або просторових інтервалів між однофазними значеннями коливальних швидкостей динамічного поширення тріщини вздовж аналізованої довжини руйнування труби. Докладніше властивості функції ритму проаналізовано у праці [21].

Методи статистичного аналізу циклічних випадкових процесів адаптували до оцінювання швидкості руйнування газопроводу, таких його імовірнісних характеристик, як початкова моментна функція першого порядку (математичне сподівання), центральна моментна функція другого порядку (дисперсія).

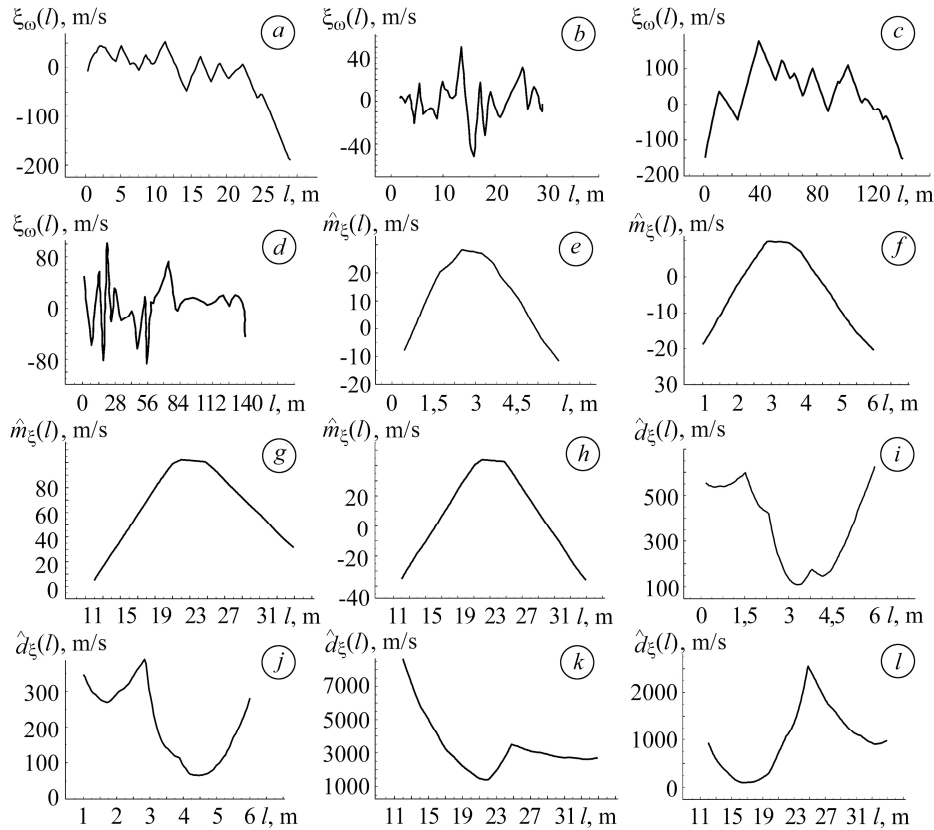


Рис. 4. Циклічна компонента росту тріщини (a–d), статистичні оцінки її математичного сподівання (e–h) та дисперсії (i–l) під час аналізу швидкості поширення тріщини в магістральній трубі на основі запропонованої моделі; a, c, e, g, i, k – для експоненти; b, d, f, h, j, l – для полінома.

Fig. 4. Cyclic component of the crack growth rate (a–d), statistical estimates of its mathematical expectation (e–h) and dispersion (i–l) in analyzing the crack propagation in the main pipe on the basis of the proposed model; a, c, e, g, i, k – for the exponent; b, d, f, h, j, l – for the polynomial.

Реалізація оцінки математичного сподівання подана у вигляді

$$\hat{m}_\xi(l) = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \xi_\omega(l + L(l, n)), \quad l \in \mathbf{W}_1 = [L_1, L_2], \quad (5)$$

де $L_1 \neq 0$ у загальному випадку, M – кількість циклів процесу (циклічної компоненти), $\xi_{\omega}(l)$ – реалізація циклічної компоненти швидкості поширення тріщини (циклічного випадкового процесу), $L(l, n)$ – функція ритму циклічного випадкового процесу, \mathbf{W}_1 – область визначення першого циклу процесу.

Реалізацію оцінки дисперсії визначали так:

$$\hat{d}_{\xi}(l) = \frac{1}{M-1} \cdot \sum_{n=1}^{M-1} \left[\xi_{\omega}(l+L(l, n)) - \hat{m}_{\xi}(l+L(l, n)) \right]^2, \quad l \in \mathbf{W}_1 = [L_1, L_2]. \quad (6)$$

Отже, за результатами моделювання запропоновано опис руйнування труби магістрального газопроводу, який ґрунтується на поглибленому вивченні результатів вимірювання кінетики поширення магістральної тріщини. Для цього застосовано континуально-кінетичні припущення, за яких руйнування розглянуто з використанням певних усереднених параметрів як неперервне накопичення та коалесценція дефектів, що спричиняють просування тріщини. При цьому зниження інтенсивності деформаційних процесів локальних ділянок матеріалу в околі вершини тріщини, яка поширюється за динамічного руйнування газопроводу, послаблює коливання її швидкості, що зумовлює зміну параметрів, поданих на рис. 4а–д.

Слід підкреслити, що одержані оцінки математичного сподівання та дисперсії (рис. 4і–л) є чутливими до зміни коливальних швидкості руйнування магістрального газопроводу, що свідчить про можливість використання цих ознак в автоматизованих системах технічного діагностування. Для апробації математичної моделі та методу аналізу здійснили серію експериментів зіставлення реальних та змодельованих реалізацій швидкості руйнування магістрального газопроводу з врахуванням отриманих статистичних оцінок та трендової компоненти.

Імітаційне моделювання динамічного поширення тріщини. Експонента як функція тренду. Оцінювали точність комп'ютерного імітаційного моделювання швидкості руйнування магістрального газопроводу запропонованим методом. Як видно з рис. 5а–д, запропоновані методи статистичної обробки враховують закономірності коливання швидкості руйнування газопроводу за росту магістральної тріщини [6, 7]. Експериментальні результати та змодельовані є достатньо близькі.

Поліном як функція тренда. Прогнозування руйнування газопроводу та розроблення методів зупинки динамічного поширення тріщини потребує однозначного математичного опису результатів, одержаних на натурних конструкціях. Результати оцінювання зміни швидкості руйнування труби за умови, коли детермінована функція тренду – поліном, дозволили кількісно проаналізувати руйнування та опосередковано оцінити координати дефектів вздовж траєкторії поширення тріщини, що важливо для аналізу макро- та мікромеханізмів руйнування. Результати комп'ютерного імітаційного моделювання швидкості руйнування магістрального газопроводу запропонованим методом кількісно зіставляли з експериментальними. Помітно (рис. 5е–h), що запропоновані методи статистичної обробки швидкості руйнування газопроводу добре описують характер ритму підростання магістральної тріщини [3, 4].

Похибки. Середньоквадратичні абсолютну та відносну похибки визначали так:

$$\Delta V(l) = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (V(k) - \hat{V}(k))^2}, \quad l = \overline{1, K}, \quad (7)$$

$$\delta V(l) = \frac{\Delta V(l)}{\sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \hat{V}(k)^2}}, \quad l = \overline{1, K}, \quad (8)$$

де $\hat{V}(k)$ – змодельована реалізація поширення тріщини в магістральній трубі з врахуванням статистичних оцінок циклічної компоненти; $V(k)$ – досліджувана реалізація.

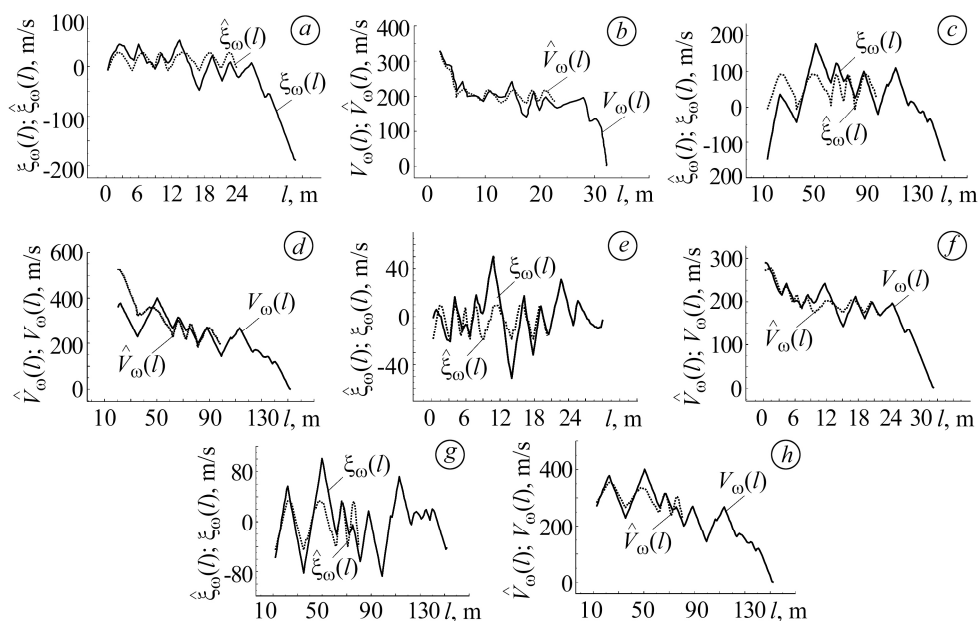


Рис. 5. Порівняння результатів імітаційного моделювання швидкості поширення тріщини в магістральній трубі (а–d) та циклічної компоненти росту тріщини (е–h) з експериментальними даними: $\hat{V}_\omega(l)$ – змодельована реалізація поширення тріщини в магістральній трубі з врахуванням статистичних оцінок циклічної та трендової компонент, $V_\omega(l)$ – вхідна реалізація швидкості росту тріщини; а–d – експонента; е–h – поліном.

Fig. 5. Comparison of the simulation of the crack growth rate in the main pipe (a–d) and cyclic component of the crack growth rate (e–h) with experimental data:

$\hat{V}_\omega(l)$ – simulated implementation of crack propagation in the main pipe, taking into account statistical estimates of cyclic component and trend component, $V_\omega(l)$ – input implementation of the process of crack growth rate; a–d – exponent; e–h – polynomial.

Встановлено (рис. 6), що відносна середньоквадратична похибка моделювання не перевищує 20...30%, що є достатнім для інженерного оцінювання. Слід зазначити, що порівняльний аналіз точності відтворення швидкості руйнування труби є індивідуальним для кожної реалізації динамічного поширення тріщини.

Крім того, у всіх експериментах [6, 7] емпірично підтверджена повторюваність (наближена до циклічної повторюваності) статистичних оцінок ймовірнісних характеристик динамічного руйнування труби магістрального газопроводу та мінливість його функцій ритму, що вказує на адекватність розроблених математичної моделі та методу, достатню обґрунтованість їх використання для моделювання, аналізу та прогнозування цього процесу.

Результати моделювання динамічного руйнування магістрального газопроводу задовільно узгоджуються з експериментальними. Вони дозволяють числово описати коливання швидкості вздовж траєкторії поширення тріщини, які є наслідком локалізації руйнування за умов динамічного накопичення дефектів. Одержані результати є основою розвитку методу комп'ютерного моделювання руйнування магістральних газопроводів. На їх основі можна розробити критерії запобігання динамічному руйнуванню і конкретні методики його прогнозування

за результатами попереднього оцінювання кінетики росту тріщини в натурних конструкціях [13, 14].

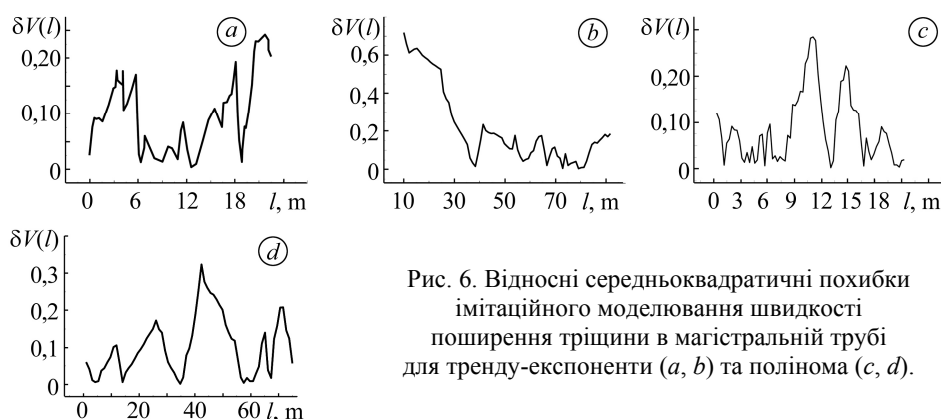


Рис. 6. Відносні середньоквадратичні похибки імітаційного моделювання швидкості поширення тріщини в магістральній трубі для тренду-експоненти (a, b) та полінома (c, d).

Fig. 6. Determination of the relative mean square errors of the simulation modelling of the crack propagation rate in the main pipe with experimental data for the trend-exponential (a, b) and polynomial (c, d).

Обговорення запропонованих підходів. Доведено, що коливання швидкості руйнування магістрального газопроводу можуть бути адекватно описані за допомогою циклічного випадкового процесу та функції тренду. На відміну від відомих детермінованих математичних моделей (див. таблицю) розглянуті математичні моделі враховують циклічність та стохастичність зміни швидкості поширення тріщини вздовж траєкторії руйнування, що дає змогу підвищити інформативність та достовірність її діагностування [22, 23]. Для інженерного застосування зручнішим є використання експоненти як функції тренду, оскільки за такого опису формула містить меншу кількість параметрів. Функція тренду у вигляді полінома дає змогу описати всі ділянки кривої руйнування труби, проте важко оцінити фізичний зміст його коефіцієнтів.

Порівняння відомих детерміністичних підходів та запропонованого методу

Основні переваги аналізованих методів	Методи опису швидкості руйнування труби		
	Детерміновані підходи	Застосування адитивної математичної моделі циклічного випадкового процесу і детермінованої функції тренду	
		Тренд у вигляді полінома	Тренд у вигляді експоненти
Фізична коректність	+	+	+
Враховує стохастичність швидкості руйнування труби	-	+	+
Враховує ритм коливань швидкості поширення тріщини	-	+	+
Дозволяє описати структуру руйнування труби у всі моменти його відтворення	-	+	-
Враховує силові чинники руйнування	+	-	-

“+” – враховує (відображає); “-” – не враховує (не відображає).

ВИСНОВКИ

Розроблено математичну модель руйнування магістрального газопроводу у вигляді суми детермінованої експоненціальної функції та циклічного випадкового процесу. Запропоновано опис динамічного руйнування труби на основі циклічного випадкового процесу для моделювання кінетики поширення тріщини. Розроблений алгоритм та створений пакет комп'ютерних програм, які ґрунтуються на запропонованій математичній моделі аналізу росту тріщини.

Як трендову компоненту застосовано поліном та функцію експоненти. Порівняно результати моделювання швидкості поширення тріщини в магістральній трубі на основі цих двох підходів. Запропоновано математичну модель, яка дозволяє врахувати структурно-механічні особливості руйнування магістрального газопроводу та відображає зв'язок нелінійності швидкості росту тріщини в металі труби з релаксаційними механізмами та стабільністю його руйнування.

Обґрунтовано методи статистичного аналізу закономірностей руйнування магістрального газопроводу на основі запропонованої математичної моделі, оцінено точність моделювання, ідентифікацію параметрів та верифікацію моделі на основі порівняння з літературними експериментальними результатами. Відносна середня похибка моделювання за використання детермінованої функції тренду становила 20...30%.

РЕЗЮМЕ. Предложен подход к математическому анализу трещиностойкости стали магистрального газопровода, который позволяет количественно оценить кинетику динамического разрушения трубы с учетом стохастичности и цикличности этого процесса. Он создает возможности моделирования распространения трещины в трубе магистрального газопровода и анализа отдельных этапов ее подрастания. Особое внимание уделено обоснованию достоверности предлагаемого подхода на основе сравнения с известным натурным экспериментом.

SUMMARY. An approach to the mathematical analysis of the fracture strength of the main gas pipe steel is proposed. It allows evaluating quantitatively the kinetics of the pipe dynamic fracture taking into account the stochastic and cyclic nature of the process. It gives the possibility of modelling the kinetics of crack propagation in the pipe of the main gas pipeline and analyzing the separate stages of its growth. Particular attention is paid to the reliability of the proposed approach based on the comparison with a known full-scale experiment.

1. *Марущак П. О., Біщак Р. Т., Данилюк І. М.* Тріщиностійкість матеріалів і конструкцій: тривалоексплуатовані магістральні газопроводи. – Тернопіль: ZAZAPRINT, 2016. – 182 с.
2. *Діагностика водневого макророзшарування в стінці гину труби системи магістральних газопроводів / Л. Є. Харченко, О. Є. Кунта, О. І. Звірко, Р. С. Савула, З. А. Дурягіна // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – 51, № 4. – С. 84–90.*
(*Diagnostics of hydrogen macrolamination in the wall of a bent pipe in the system of gas mains / L. E. Kharchenko, O. E. Kunta, O. I. Zvirko, R. S. Savula, Z. A. Duryahina // Materials Science. – 2016. – 51, № 4. – P. 530–537.*)
3. *The development and validation of a dynamic fracture propagation model for gas transmission pipelines / P. E. O'Donoghue, M. F. Kanninen, C. P. Leung, G. Demofonti, S. Venzi // Int. J. Pres. Ves. & Pipping. – 1997. – 70. – P. 1–25.*
4. *O'Donoghue P. E. and Zhuang Z.* A finite element model for crack arrestor design in gas pipelines // *Fatig. & Frac. of Eng. Mater. & Struct.* – 1999. – 22. – P. 59–66.
5. *A damage mechanics based evaluation of dynamic fracture resistance in gas pipelines / I. Scheider, A. Nonn, A. Völling, A. Mondry, C. Kalwa // Procedia Mater. Sci. – 2014. – 3. – P. 1956–1964.*
6. *Oikonomidis F., Shterenlikht A., and Truman C. E.* Prediction of crack propagation and arrest in X100 natural gas transmission pipelines with the strain rate dependent damage model (SRDD). P. 1: A novel specimen for the measurement of high strain rate fracture properties and validation of the SRDD model parameters // *Int. J. Pres. Ves. and Piping.* – 2013. – 105–106. – P. 60–68.

7. *Oikonomidis F., Shterenlikht A., and Truman C. E.* Prediction of crack propagation and arrest in X100 natural gas transmission pipelines with a strain rate dependent damage model (SRDD). Part 2: Large scale pipe models with gas depressurisation // *Int. J. Pres. Ves. & Pipping*. – 2014. – **122**. – P. 15–21.
8. *Dynamic fracture study by an experiment/simulation method for rich gas transmission X80 steel pipelines / X. B. Yang, Z. Zhuang, X. C. You, Y. R. Feng, C. Y. Huo, C. J. Zhuang // Engng Fract. Mech.* – 2008. – **75**, № 18. – P. 5018–5028.
9. *Resistance of X80 steel to ductile-crack propagation in major gas lines / A. Arabei, I. Pyshmintsev, M. Shtremel, A. Glebov, A. Struin, A. Gervasev // Steel Transl.* – 2009. – **39**, № 9. – P. 719–724.
10. *Yu P. S. and Ru C. Q.* Strain rate effects on dynamic fracture of pipeline steels: finite element simulation // *Int. J. Pres. Ves. & Pipping*. – 2015. – **126**. – P. 1–7.
11. *Transferability of decompression wave speed measured by a small-diameter shock tube to full size pipelines and implications for determining required fracture propagation resistance / K. K. Botros, J. Geerligs, B. Rothwell, L. Carlson, L. Fletcher, P. Venton // Int. J. Pres. Ves. & Pipping.* – 2010. – **87**, № 12. – P. 681–695.
12. *A new coupled fluid-structure modeling methodology for running ductile fracture / H. O. Nordhagen, S. Kragset, T. Berstad, A. Morin, C. Dorum, S. T. Munkejord // Comp. and Struct.* – 2012. – **94–95**. – P. 13–21.
13. *Large-diameter X 100 gas line pipes: Fracture propagation evaluation by full-scale burst test / G. Demofonti, G. Mannucci, C. M. Spinelli, L. Barsanti, H. G. Hillenbrand // Pipeline Technology.* – 2000. – **1**. – P. 509–520.
14. *Zhuang Z. and O'Donoghue P. E.* The recent development of analysis methodology for rapid crack propagation and arrest in gas pipelines // *Int. J. of Fract.* – 2000. – **101**, № 3. – P. 269–290.
15. *Ren Z. J. and Ru C. Q.* Numerical investigation of speed dependent dynamic fracture toughness of line pipe steels // *Engng Fract. Mech.* – 2013. – **99**. – P. 214–222.
16. *Mirzaei M., Najafi M., and Niasari H.* Experimental and numerical analysis of dynamic rupture of steel pipes under internal high-speed moving pressures // *Int. J. of Impact Engng.* – 2015. – **85**. – P. 27–36.
17. *Аналіз кінетики динамічного поширення тріщини в трубі магістрального газопроводу як циклічного випадкового процесу / Я. В. Литвиненко, П. О. Марушак, Л. Я. Покорний, Д. Я. Баран // Тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф. “Нафтогазова енергетика-2017” (15–19 травня). – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017. – С. 380–382.*
18. *Литвиненко Я. В., Марушак П. О., Лавренюк Т. П.* Сегментація циклічних сигналів в задачах цифрової обробки даних: детермінований підхід // *Мат-ли III-ої Всеукр. конф. “Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування” (8–9 червня).* – Тернопіль: ТНТУ, 2017. – С. 155–157.
19. *Литвиненко Я. В.* Метод квадратичної інтерполяції дискретної функції ритму циклічного сигналу із визначеною сегментною структурою // *Вісник Тернопільськ. нац. техн. ун-ту.* – 2016. – **84**, № 4. – С. 131–138.
20. *Lytvynenko I. V., Maruschak P. O., Lupenko S. A.* Processing and modeling of ordered relief at the surface of heat-resistant steels after laser irradiation as a cyclic random process // *Automatic Control and Computer Sciences.* – 2014. – **48**, № 1. – P. 1–9.
21. *Lytvynenko I. V., Maruschak P. O.* Analysis of the state of the modified nanotitanium surface with the use of the mathematical model of a cyclic random process // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.* – 2015. – **51**, № 3. – P. 254–263.
22. *Segmentation and statistical processing of geometric and spatial data on self-organized surface relief of statically deformed aluminum alloy / I. Lytvynenko, P. Maruschak, S. Lupenko, S. Panin // Appl. Mech. and Mater.* – 2015. – **770**. – P. 288–293.
23. *Литвиненко Я. В., Марушак П. О.* Застосування адитивної математичної моделі циклічного випадкового процесу і поліноміальної функції для виявлення закономірностей динамічного руйнування магістрального газопроводу // *Тези доп. IV-ої Міжнар. наук.-техн. конф. “Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах” (31 жовтня – 2 листопада).* – Вінниця: ВНТУ, 2017. – С. 167–169.

Одержано 13.10.2017