

УДК 539.43: 621.64

**О.О. Ларін, К.Є. Потопальська***Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»***ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОЇ МІЦНОСТІ КРИВОЛІНІЙНОЇ ДІЛЯНКИ ТРУБОПРОВОДУ ЗІ СТАТИСТИЧНО ЗАДАНИМ КОРОЗІЙНИМ ДЕФЕКТОМ, ЩО РОЗВИВАЄТЬСЯ У ЧАСІ**

*В даній роботі проводилося дослідження з оцінки впливу корозійного об'ємного дефекту на працездатність коліна трубопроводу. Розвиток дефекту моделюється у часі. Оцінка характеристик напружено-деформованого стану конструкцій з пошкодженням проводилась в рамках засобів комп'ютерного моделювання з використанням методу скінченних елементів. Визначено зони, в яких є локалізація максимальних напружень в пошкодженій ділянці трубопроводу з урахуванням стохастичного характеру розвитку корозійного пошкодження та наведена оцінка його впливу на залишкову міцність конструкції в період експлуатації від 35 до 45 років.*

*Ключові слова:* корозійне пошкодження, магістральний трубопровід, надійність.

**А.А. Ларин, К.Е. Потопальская****ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ КРИВОЛИНЕЙНОГО УЧАСТКА ТРУБОПРОВОДА СО СТАТИСТИЧЕСКИ ЗАДАНЫМ КОРРОЗИОННЫМ ДЕФЕКТОМ, КОТОРЫЙ РАЗВИВАЕТСЯ ВО ВРЕМЕНИ**

*В данной работе проводилось исследование по оценке влияния коррозионного объемного дефекта, развивающегося во времени, на работоспособность колена трубопровода. Оценка характеристик напряженно-деформированного состояния конструкции с повреждением проводилась в рамках современных средств компьютерного моделирования с использованием метода конечных элементов. Определены зоны, в которых происходит локализация максимальных напряжений в поврежденном участке трубопровода с учетом стохастического характера развития коррозионного повреждения и приведена оценка его влияния на остаточную прочность конструкции в период эксплуатации от 35 до 45 лет.*

*Ключевые слова:* коррозионное повреждение, магистральный трубопровод, надежность

**O. Larin, K. Potopalska****AN ESTIMATION OF RESIDUAL STRENGTH OF CURVELINEAR PIPELINE PART BASED ON A STATISTICAL CORROSION DEFECT WHICH IS DEVELOPING OVER A TIME**

*Pipelines are used as one of the most practical and low cost methods for transmission of different liquid petroleum products and gases. Damage on the pipeline is capable to appears during operation due to the accumulation of fatigue and arising of corrosion. In this paper, the assess of effect of a corrosion volumetric defect which is developing over time on the working capacity of the pipeline elbow has been carried out. The estimation of the characteristics of the stress-strain state of a design with damage is carried out with the framework of computer simulation using the finite element method (FEM). Corrosion damage models explicitly as volumetric defect on the out surface of the pipeline elbow. The zones on the damaged section of the pipeline on which the maximum stresses are localized has been defined, taking into account the stochastic nature of the development of corrosion damage. On the basis of the obtained results, the probabilistic characteristics of the stress strain state has been determined, such as mean value, coefficients of variation and asymmetry. On the basis of these data, probability densities function of plasticity appearance have been obtained for different design time in operation at appropriate loading levels.*

*Keywords:* corrosion damage, pipeline, reliability

**Постановка проблеми.** Трубопроводи це один з найпоширеніших засобів транспортування різних рідких речовин і газів. Пошкодження трубопроводу, які виникають під час тривалої експлуатації, здатні з'являтися як наслідок накопичення втоми та прояву процесів корозії на поверхні елементів конструкції та можуть призвести до появи тріщин. На зародження та розвиток дефекту впливає багато зовнішніх факторів, таких як навколишнє середовище в якому знаходиться конструкція, варіація експлуатаційного навантаження та інше. Тому розвиток поверхневих корозійних дефектів слід розглядати у ймовірнісній постановці. Своєчасне діагностування таких пошкоджень може запобігти виникненню аварійно-небезпечних ситуацій, екологічних катастроф та забруднення. Попередження відповідних подій за рахунок вчасного проведення технічного обслуговування та ремонту є вкрай важливою задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розвиток корозійних дефектів, особливості їх росту в елементах конструкцій та вплив на залишкову міцність викликають інтерес у інженерів і дослідників в галузі аналізу та прогнозування ініціації корозії, а також моделювання її розвитку [1]. Питання вивчення причин зародження корозії знаходяться в компетенції фізичної хімії та матеріалознавства. При цьому розглядаються задачі визначення технологічних засобів підвищення стійкості матеріалу конструкції до окислення або інших хімічних реакцій. Розвитку корозії, як процесу також приділено багато уваги [2–4]. Звичайно, велику увагу в цих роботах приділяють

експериментальним дослідженням росту корозійних пошкоджень, аналізують швидкість росту, а також вплив на неї зовнішніх чинників [5]. З іншого боку дуже поширені підходи математичного моделювання процесу росту корозії, які можна використовувати для прогнозування надійності та оцінки залишкової міцності конструкцій, що вже є пошкодженими. В сучасних дослідженнях досить часто оцінюють міцність конструкції за допомогою явного моделювання пошкодження [6–14], яке зазвичай проводиться у програмних комплексах з використанням методу скінчених елементів (МСЕ). Такій підхід дозволяє чисельно дослідити зміни напружено-деформованого стану (НДС) трубопроводу з дефектами різної форми та в різних місцях конструкції. Найвідоміші в літературі дослідження зосереджено на оцінці залишкової міцності трубопроводів з корозійними дефектами на його прямих ділянках [2,4,15,16]. Є роботи в яких аналізується напружений стан коліна трубопроводу, де показано, що корозійне пошкодження на криволінійній частині трубопроводу призводить до більшої концентрації напружень [10,17]. Але в зазначених дослідженнях розглядаються дефекти з фіксованими розмірами, хоча розвиток корозії це процес, який слід розглядати залежно від часу експлуатації. Таким чином актуальним є проведення досліджень щодо міцності криволінійної частини трубопроводу на основі тривимірних моделей з одночасним моделюванням процесу можливого корозійного пошкодження.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є оцінка залишкової міцності пошкодженого коліна трубопроводу на основі статистичної оцінки концентрації НДС конструкції з корозійним дефектом, що задається із випадковими розмірами в залежності від часу його виникнення.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити параметричну математичну модель визначення НДС конструкції, яка має складну тривимірну криволінійну геометрію і об'ємний поверхневий дефект корозійної природи.
- Провести оцінку його впливу на залишкову міцність конструкції на основі статистичного моделювання методом Монте-Карло з урахуванням експлуатаційного навантаження і стохастичного характеру розвитку розмірів корозійного пошкодження.

**Викладення основного матеріалу.** В роботі моделюється фрагмент коліна трубопроводу з урахуванням його криволінійної геометрії, нелінійними властивостями матеріалу та навантаженням, які відповідають стандарту ASME B31G. Модель складається з тороїдальної і циліндричної частин. Для розрахунку було обрано наступні значення розмірів конструкції: зовнішній радіус трубопроводу  $D = 508$  мм; товщина стінки  $h = 12,5$  мм; довжина досліджуваної частини трубопроводу  $l = 1,5$  м (відповідно до X42 типу трубопроводу). Довжину прямої частини секції труби вибирали апостеріорно після низки попередніх випробувань, коли крайові ефекти в моделі не впливають на деформований стан в досліджуваному перерізі труби. Матеріалом є сталь, властивості якої наведено в таблиці 1.

Таблиця 1.

Властивості матеріалу трубопроводу

Параметр	Модуль пружності	Коефіцієнт Пуассона	Границя плинності	Границя міцності
Позначення	$E$ , ГПа	$\nu$	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа
Значення	205	0.3	290	430

Ділянку трубопроводу навантажено внутрішнім тиском  $P$  і зафіксовано по краях. Для такого типу трубопроводів номінальний (робочій) тиск дорівнює 3 МПа. Також треба зазначити, що при експлуатації з певною частотою буває включення та виключення подачі речовини у трубопровід. При цьому значення внутрішнього тиску може бути більше робочого. Рівень максимального навантаження залежить від області розташування трубопроводу та відповідно до ASME B31.8 (2003) може змінюватися від 6 МПа до 12,8 МПа (табл. 2), де LC1- LC4 – характерні місця розташування ділянки, що досліджується.

Таблиця 2.

Зміна внутрішнього тиску

Область розташування	Типове значення	LC1	LC2	LC3	LC4
Максимальний тиск, МПа	6	12.8	10.6	8.6	7.1

**Моделювання поверхневого дефекту.** Об'ємний поверхневий дефект моделюється в центрі зовнішньої поверхні ділянки коліна трубопроводу (рис.2). Для дослідження було обрано дефект у формі паралелепіпеду із закругленими границями. Оскільки дефект розташований на поверхні вигину труби, ескіз був спроектований в локальній тороїдальній системі координат, яка залежить від радіуса коліна трубопроводу  $R$ . Геометричні параметри, такі як довжина ( $d_1$ ), ширина ( $d_2$ ) та глибина ( $d_3=h-d$ ), задано параметрично. Це дозволяє автоматично перебудовувати модель в залежності від розмірів.

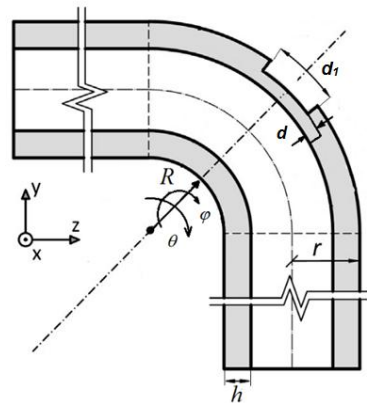


Рис. 1. Ескіз розрахункової моделі

Конкретні розміри дефекту визначаються з аналізу поточного стану його розвитку. Тому в роботі пропонується отримувати розрахункові моделі з дефектом певного рівня розвитку та вивчати залишкову міцність трубопроводу у певний час його експлуатації. З аналізу відомих досліджень можна підсумувати, що зазвичай при оцінці росту дефектів використовують лінійні [8] або нелінійні [18,19] моделі для кінетики росту корозії.

В даній роботі пропонується враховувати ріст дефекту у часі у вигляді степеневі функції, яка пов'язує час експлуатації та характерний розмір  $d_j(t)$  [9]

$$d_j(t) = k(t - t_0)^\alpha, \quad (1)$$

де  $t_0$  – час появи корозійного пошкодження,  $\alpha$  та  $k$  – це показники кінетики росту пошкоджуваності. З літературних даних та практики експлуатації трубопроводів відомо, що типово за 5 років на поверхні трубопроводу виникають пошкодження корозійного типу. Тому при розрахунках було обрано  $t_0 = 5$  років. Процес розвитку корозії є випадковим, що може бути враховано, якщо показники рівняння кінетики її росту (1):  $\alpha$  та  $k$  вважати випадковими величинами. Такий підхід широко використовується в літературі [5,18,20]. При цьому відомо [18,20] багато статистичних даних щодо можливих значень параметрів  $\alpha$  та  $k$  і їх можливої варіації, зокрема і в залежності від зовнішніх чинників, а також різних напрямків росту корозійного пошкодження (тобто у глибину та по поверхні у ширину і довжину).

Параметр  $k$  здатен суттєво змінюватись, навіть за більш-менш однакових зовнішніх факторах. Параметр  $\alpha$  в деяких дослідженнях вважається сталою детермінованою величиною [18], але є робота, що аналізує його зі статистичної точки зору [20]. Проте його можлива варіація є не суттєвою, тому в даній роботі пропонується вважати параметр  $\alpha$  фіксованим та таким, що дорівнює 0,73 [17].

Із статистичних даних відомо, також що розподіл значень розмірів дефекту із достатньою точністю можна вважати підпорядкованим підпорядковується логнормальному закону розподілення [20]

$$f(d_j, t) = \frac{1}{d_j \sigma_j(t) \sqrt{2\pi}} \exp \left[ \frac{(-\ln d_j - \mu_j(t))^2}{2\sigma_j^2(t)} \right], \quad (2)$$

де  $\sigma_j(t)$  та  $\mu_j(t)$  – це параметри закону, які залежать відповідно до розміру дефекту у поточний час експлуатації та визначаються через співвідношення (1) з коефіцієнту варіації та математичного очікування габаритних розмірів дефекту наступим чином:

$$\mu_j(t) = \ln \left( \frac{m_j(t)}{\sqrt{1 + \frac{v_j}{m_j^2(t)}}} \right), \quad \sigma_j^2(t) = \ln \left( 1 + \frac{v_j}{m_j^2(t)} \right), \quad (3)$$

$$m_j(t) = \langle d_j(t) \rangle = \langle k_j \rangle (t - t_0)^\alpha, \quad \sigma_{d_j}^2(t) = \langle d_j(t)^2 \rangle = \sigma_{k_j}^2 (t - t_0)^{2\alpha}, \quad v_j = \frac{\sigma_{d_j}(t)}{m_j(t)} = \frac{\sigma_{k_j}}{k_j} = \text{const}, \quad (4)$$

де  $\langle \dots \rangle$  – оператор усереднення,  $m_j(t)$  – математичне очікування,  $v_j$  – коефіцієнт варіації, який залежить від часу. На рисунку 2 на схематично зображено розвиток у часі середньої глибини корозійного пошкодження  $m_3(t)$  та можливий розкид її значень у часі.

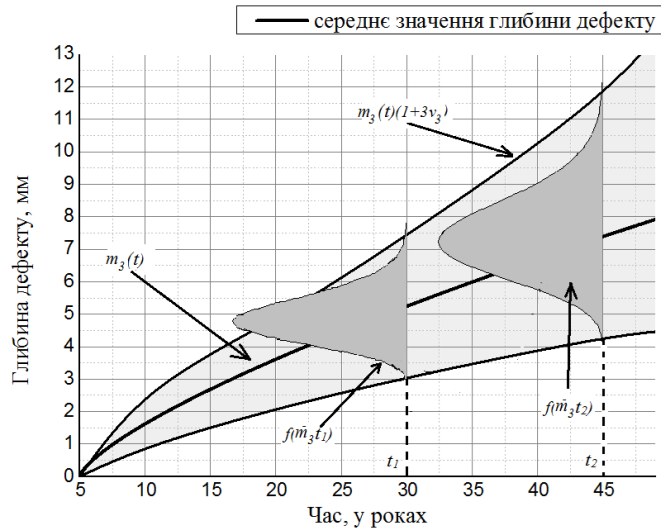


Рис.2. Графік можливої зміни глибини дефекту у часі та у поточний рік експлуатації

**Скінчено-елементна модель.** Для визначення НДС криволінійної частини трубопроводу використовували МСЕ. При розрахунках було використано чверть моделі, в якій враховано симетрію трубопроводу.

При створенні сітки враховували особливості моделі. Розмір елемента поступово зменшується при наближенні до зони з пошкодженням. Задано чотири елементи за товщиною. На непошкоджених ділянках трубопроводу будували впорядковану гексагональну сітку, у зоні дефекту – тетраедральну. Використовували ізопараметричний скінчений елемент з 8-ма вузлами та зі 3-ма ступенями вільності у вузлі. Сітку усєї моделі та детально поверхневий дефект зображено на рис.3.

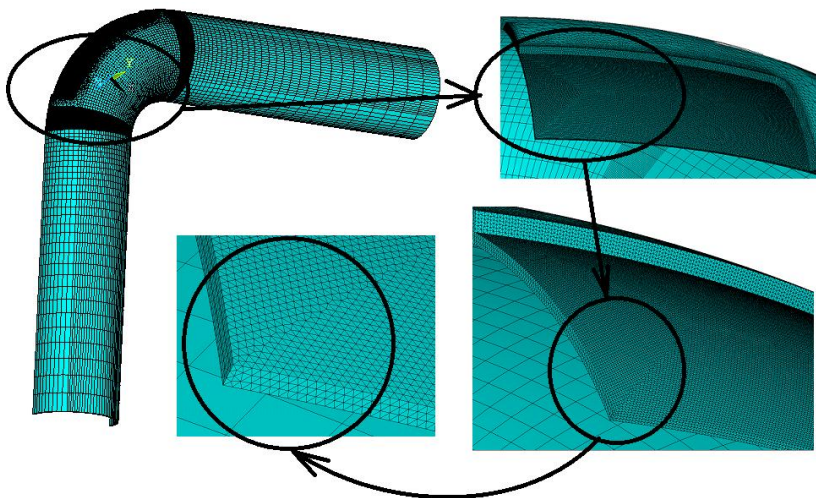
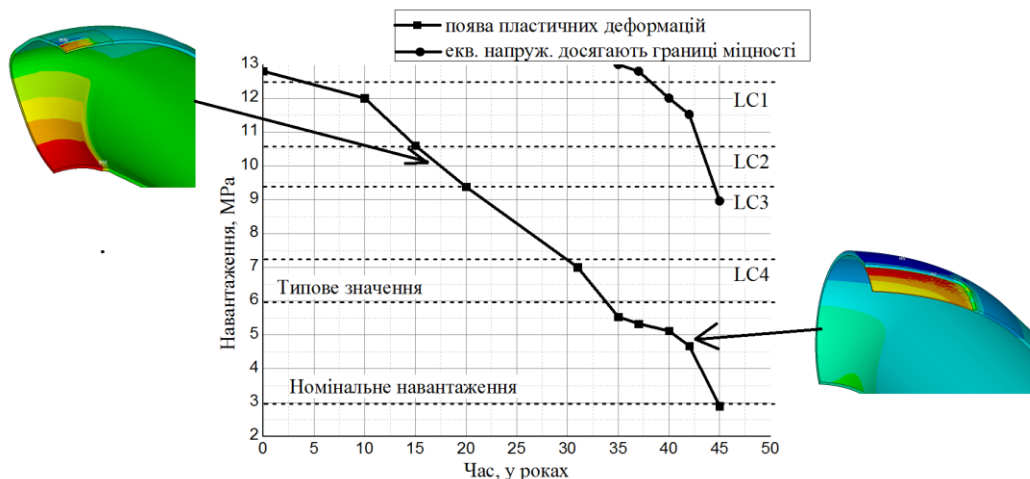


Рис. 3. Сітка чверті коліна трубопроводу

**Результати досліджень.** Попередньо було проведено серію розрахунків коліна трубопроводу з середніми розмірами дефекту відповідно до геометричних параметрів, що

відповідали різному часу життя пошкодженого трубопроводу (період від 10 до 45 років). Виявлено, що пластичні деформації у першу чергу з'являються у поздовжньому напрямку пошкодження. Також треба зазначити, що при експлуатації конструкції з фіксованими розмірами дефекту, що до 23 років пластичні деформації починають з'являтися у протилежному напрямку відносно дефекту, тобто у місці найбільшої кривизни. Більш того ці деформації з'являються за великих значень внутрішнього тиску, які не відповідають умовам експлуатації. Таким чином можна зробити висновок, що поверхневий дефект з середніми габаритними розмірами протягом перших 23 років не впливає суттєво на НДС конструкції. На рис. 4 показано при якому навантаженні в конструкції з середніми розмірами дефекту еквівалентні напруження досягають границі плинності та міцності.



**Рис.4. Значення внутрішнього тиску, що призводить до появи пластичних деформацій в конструкції та досягання границі міцності при середніх розмірах об'ємного дефекту**

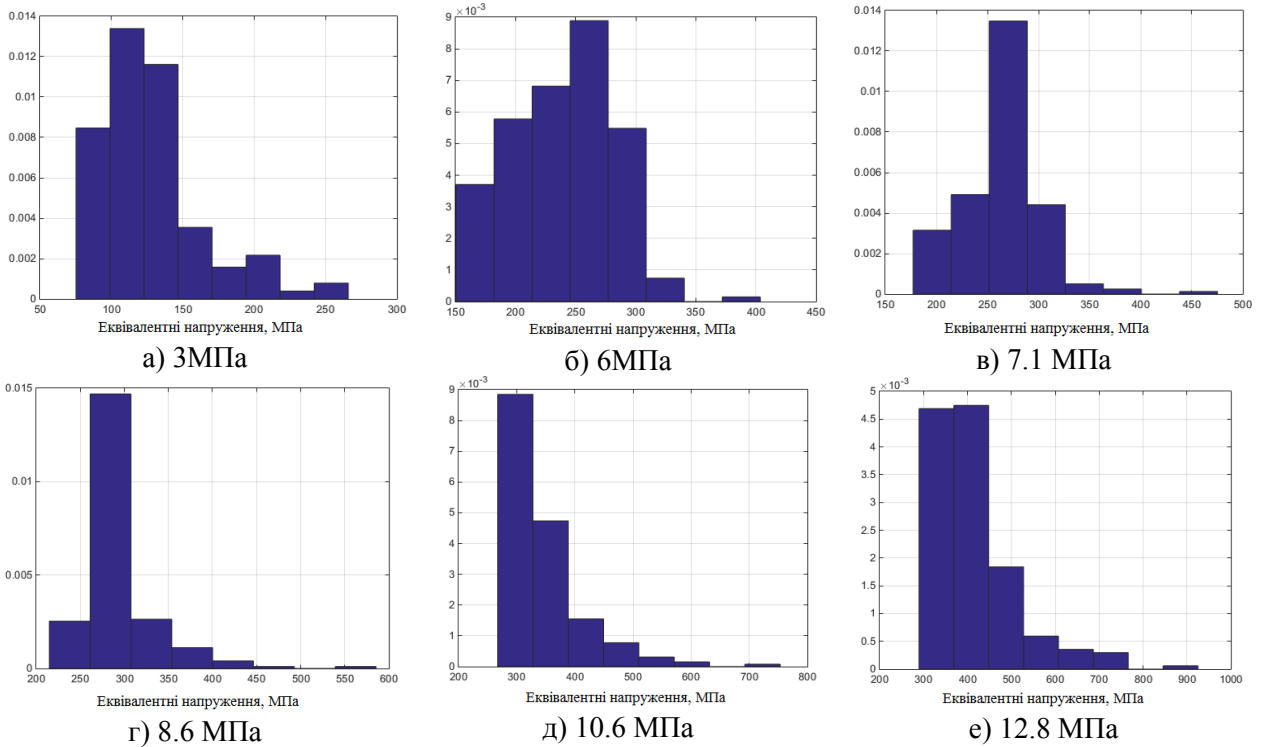
На рис.4 лінією з прямокутними маркерами відображено зміну значення внутрішнього тиску, при якому в конструкції виникають пластичні деформації у відповідний період експлуатації трубопроводу з об'ємним дефектом середніх розмірів. Прямими лініями вказано значення максимального зовнішнього навантаження в залежності від області розташування трубопроводу.

Виявлено, що у період після 35 років експлуатації у трубопроводі можуть з'являтися пластичні деформації при типовому навантаженні (рис.4 лінія з прямокутними маркерами). В період експлуатації від 37 років у трубопроводі з відповідним дефектом при дії максимально можливого навантаження виникають напруження, які привішують границю міцності (рис.4 лінія з круглими маркерами).

Тому подальші дослідження пошкодженого трубопроводу проводилось для періоду експлуатації з 35 до 45 років. Для кожного моменту часу (від 35 до 45 років) було проведено біля 200 розрахунків з випадковими розмірами дефекту, які підпорядковуються логнормальному закону розподілення та мають відповідні відомі ймовірнісні характеристики (3-4).

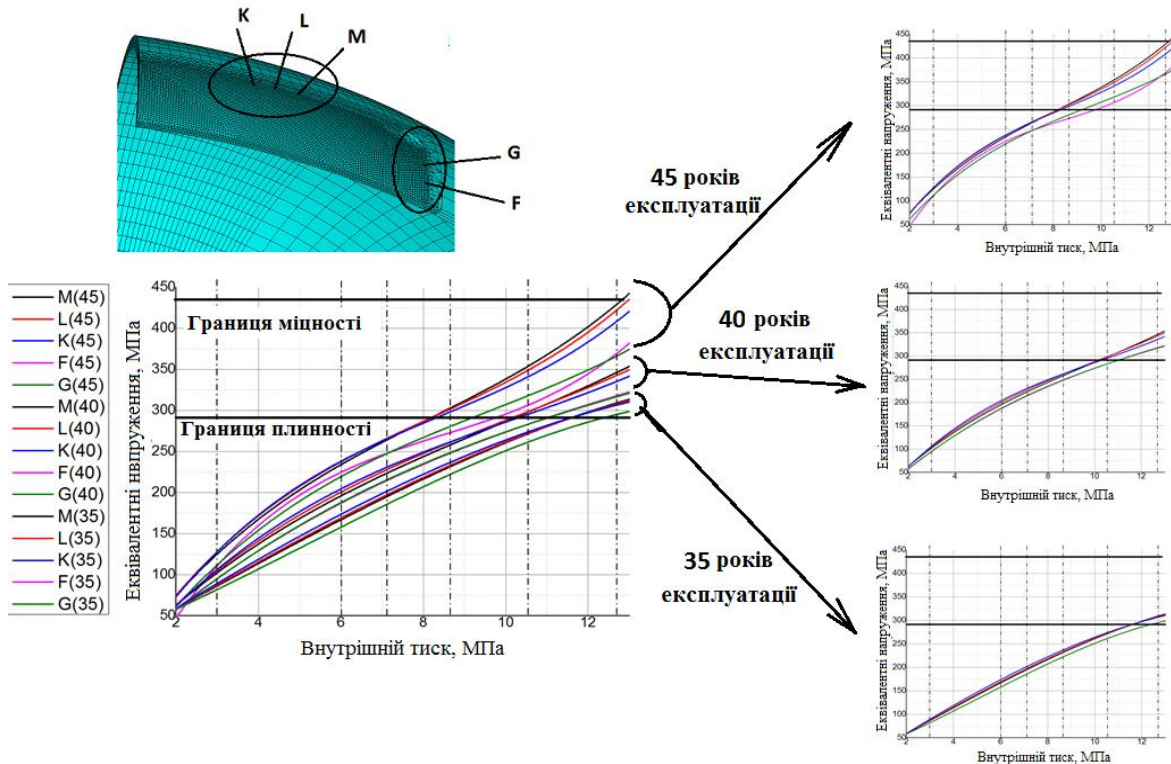
Для аналізу результатів було обрано 5 вузлів (K,L,H,G,F на рис.5) на конструкції в зоні з дефектом, що знаходяться в типових місцях появи пластичних деформацій, які були виявлені при попередніх дослідженнях.

Після проведених розрахунків отримані ймовірнісні характеристики НДС конструкції при різних рівнях навантаження та у різний термін експлуатації. Отримані дані по еквівалентним напруженням за критерієм Мізеса, які було статистично оброблено. Сформовані гістограми для різних рівнів навантаження та визначені середні значення, дисперсії та коефіцієнти асиметрії гістограм.



**Рис.5. Гістограми розподілу максимальних еквівалентних напружень в конструкції з пошкодженням при терміні експлуатації 45 років при різних рівнях навантаження**

На рис. 6 показана залежність математичного очікування напружень від внутрішнього тиску. З отриманих результатів визначено, що при експлуатації трубопроводу при максимальному навантаженні починаючи з 35 років напруження, що виникають привіщують границю плинності. А при експлуатації 45 років в декількох точках конструкції виникаючі напруження привіщують границю міцності. З графіків видно, що характер зміни напружень однаковий в усіх розглянутих випадках. Але відомість є в тому, що при збільшенні терміну експлуатації розкид напружень у відповідних вузлах починає збільшуватись.



**Рис.6. Математичне очікування еквівалентних напружень при різних термінах експлуатації в вузлах у дефекті**

На рис.7 представленні результати статистичної обробки коефіцієнтів варіації та асиметрії напружень в дефекті. З отриманих результатів можна зробити висновок, що при тиску від 6 МПа до 9 МПа розкид значень еквівалентних напружень не великий, що свідчить про те, що у цьому діапазоні навантаження значення виникаючих еквівалентних напружень близький та досягають границі плинності.

Залежність коефіцієнту асиметрії гістограм напружень в дефекті (рис 7 б) від внутрішнього тиску показує, що розподіл напружень відхиляється вліво при навантаженні від 2 МПа до 4 МПа та від 9 МПа до 12 МПа. А при навантаженні від 4 до 9 МПа розподіл майже симетричний.

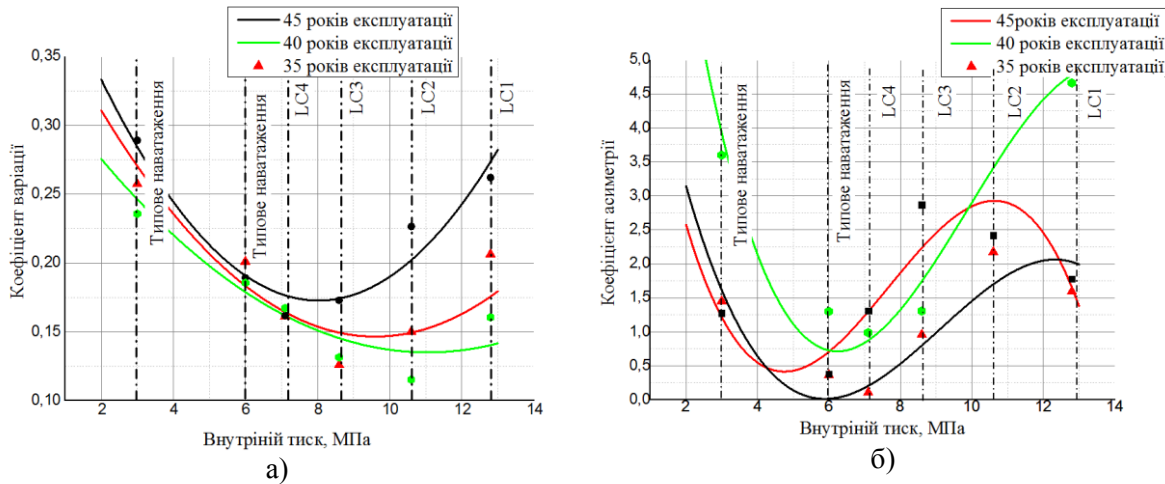


Рис.7. Коефіцієнти варіації (а) та асиметрії (б) гістограм напружень

Аналіз виду гістограм та отриманих показників вказує на те що, нажаль дані не підпорядковуються відомим законам розподілення. Через те, що при різних рівнях навантаження характер розподілу напружень різний (або асиметрія в ліво, або симетрія відносно центру)

Тому для апроксимації гістограм пропонується щільність ймовірності розглядати як ортогональний ряд Лагера [21]. Вибір такого розподілу обумовлено тим, що даний ряд дає функцію, яка є позитивно визначеною та при врахуванні тільки одного члену ряду приймає вид гамма-розподілення, яке саме по собі добре підходить для багатьох результатів. Апроксимація за допомогою ряду Лагера має наступний вигляд [21]:

$$f_1(x) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n e^{-x} x^{\alpha} L_n^{(\alpha)}(x), \quad (5)$$

де  $L_n^{(\alpha)}(x)$  – це узагальнений поліном Лагера,  $x$  – випадкова величина,  $\alpha$  – довільна константа,  $c_n$  – коефіцієнт розкладання. Узагальнений поліном Лагера має такий вигляд [20]:

$$L_n^{(\alpha)}(x) = e^x \frac{x^{-\alpha}}{n!} \frac{d^n}{dx^n} (e^{-x} x^{n+\alpha}) \quad (6)$$

При використанні даної щільності ймовірності було достатньо обмежитись першими чотирма членами ряду:

$$\begin{aligned} L_0^{(\alpha)}(x) &= 1; \\ L_1^{(\alpha)}(x) &= 1 + \alpha - x; \\ 2L_2^{(\alpha)}(x) &= (\alpha + 1)(\alpha + 2) - 2x(\alpha + 2) + x^2; \\ 6L_3^{(\alpha)}(x) &= (\alpha + 1)(\alpha + 2)(\alpha + 3) - 3x(\alpha + 2)(\alpha + 3) + 3x^2(\alpha + 3) - x^3. \end{aligned} \quad (7)$$

Коефіцієнти ряду визначаються зі статистичних моментів, які було проаналізовано як функції робочого тиску та очікуваного часу експлуатації (рис. 7). Для їх визначення зробимо заміну випадкової величини  $y = x/\beta$  з щільністю ймовірності  $f(y)$ , при чому  $f(y) = f(x/\beta)/\beta$ .

$$f(y) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n e^{-y} y^{\alpha} L_n^{(\alpha)}(y), \quad (8)$$

де коефіцієнти  $b_n$  виражаються наступним чином:

$$b_n = \frac{n!}{\Gamma(n+\alpha+1)} \int_0^\infty L_n^\alpha(y) f(y) dy = \frac{n!}{\Gamma(n+\alpha+1)} \int_0^\infty L_n^\alpha\left(\frac{\alpha}{\beta}\right) f_1(x) dx \quad (9)$$

Якщо підставити вирази поліномів Лагера (6) у (8) та врахувати умову нормування щільності ймовірності та визначення початкових моментів, то можна отримати:

$$b_1 = \frac{1+\alpha - m_{n1}/\beta}{\Gamma(\alpha+2)}, \quad (10)$$

$$b_2 = \frac{1}{\Gamma(\alpha+3)} \left[ (\alpha+1)(\alpha+2) - \frac{2m_{n1}}{\beta}(\alpha+2) + \frac{m_{n2}}{\beta^2} \right]$$

Оскільки в (7) та (8) коефіцієнти  $\alpha$  та  $\beta$  довільні, то їх можна вибрати [21] таким чином, щоб  $b_1 = b_2 = 0$ . Для цього прирівнюємо праві частини виразів (10) нулю та вирішуємо систему рівнянь, після чого отримуємо коефіцієнти  $b_n$ , які виражаються через початкові статистичні моменти  $m_{ni}$ . Тобто виразити через математичне очікування  $m_\sigma$ , дисперсію  $\sigma_\sigma^2$  та коефіцієнт асиметрії  $a_\sigma$ . Дійсно:

$$\alpha = \frac{m_\sigma^2}{\sigma_\sigma^2} - 1; \quad \beta = \frac{\sigma_\sigma^2}{m_\sigma}, \quad (11)$$

$$b_0 = \frac{1}{\Gamma(\alpha+1)}, \quad b_1 = 0, \quad b_2 = 0, \quad b_3 = \frac{1}{\Gamma(\alpha+4)} \left[ \frac{m_{n2}}{\beta^2}(\alpha+3) - \frac{m_{n3}}{\beta^3} \right]. \quad (12)$$

де

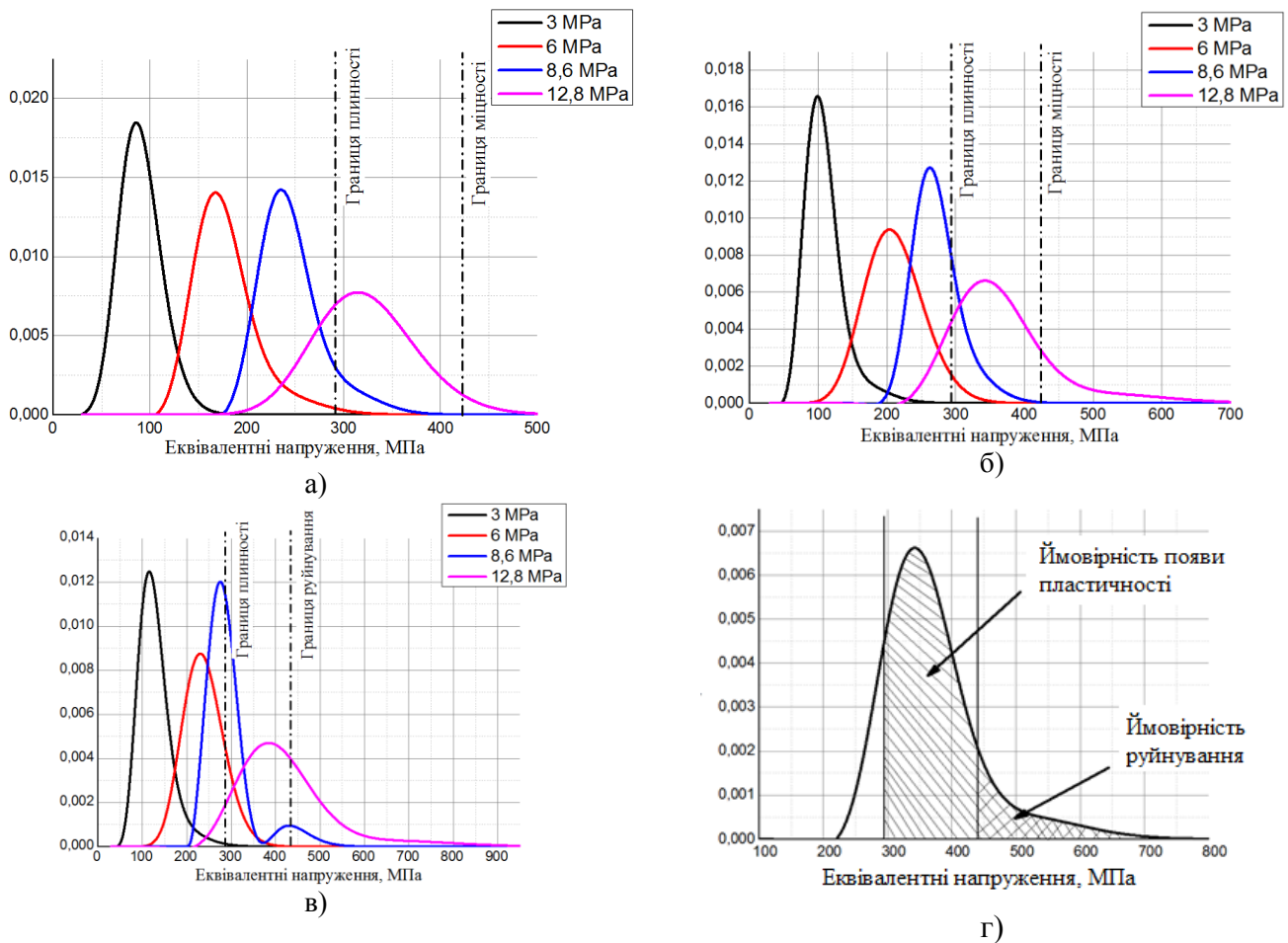
$$m_{n1} = m_\sigma(p, t), \quad m_{n2} = m_\sigma^2(p, t) + \sigma_\sigma^2(p, t), \quad m_{n3} = a_\sigma(p, t)\sigma_\sigma^3 + 3m_\sigma(p, t)\sigma_\sigma^2 + m_\sigma^3(p, t) \quad (13)$$

Після підстановки отриманих даних у (8) з використанням (7),(10)-(12) були отримані щільності ймовірності для термінів експлуатації 35, 40 та 45 років відповідно та для різних рівнів робочого навантаження. Зазначений розкид показано на рис. 7а-в.

Після інтегрування отриманих щільностей ймовірності (7) по внутрішньому навантаженню відповідно до терміну експлуатації за наступною формулою можна отримати залежність ймовірність появи пластичності  $Q$  від рівня навантаження та часу, який відпрацювала конструкція:

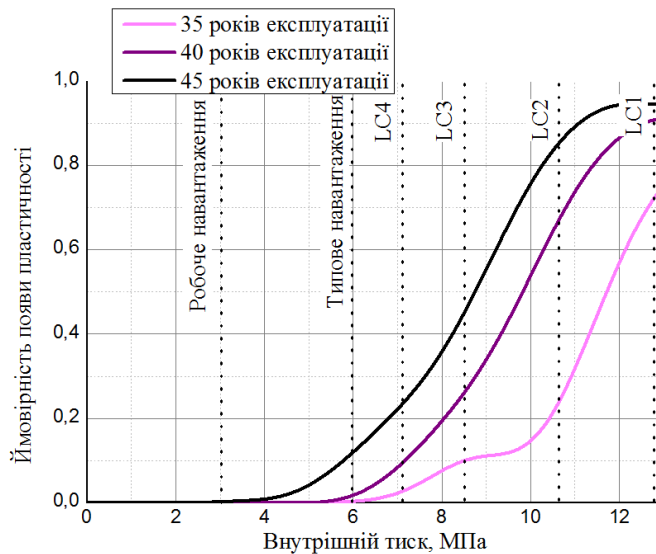
$$Q(p, t) = 1 - \int_0^{\sigma_y} f(y|p, t) dy \quad (13)$$

На рис. 8 приведено щільності ймовірності для різних рівнів навантаження для різних термінів експлуатації. Вертикальними лініями зображені границі плинності та міцності матеріалу відповідно. З графіків видно, що при номінальному навантаженні 3 МПа тільки при експлуатації терміном 45 років можуть з'являтися пластичні деформації. Ймовірність руйнування виникає при навантаженні 12,8 МПа при всіх представлених розрахунках та дорівнює відповідно для 35 років – 0,117, 45 років – 0,4. На рис.8 з схематично показано зону площі якої відповідає ймовірності появи пластичних деформації у конструкції (штриховка однією лінією). А площа зони, яка заштрихована двома лініями це ймовірність того, що еквівалентні напруження перевищують границю міцності, тобто ймовірність руйнування.



**Рис.8. Щільності ймовірності максимальних еквівалентних напружень в конструкції з пошкодженням при терміні експлуатації 35 (а), 40 (б) та 45 (в) років при різних рівнях навантаження**

Таким чином, окремо для кожного рівня навантаження та для відповідного терміну експлуатації можна отримати ймовірність появи пластичності у матеріалі рис.9.



**Рис.9. Ймовірність появи пластичних деформацій в конструкції при різних термінах експлуатації та рівнях навантаження**

При експлуатації 45 років ймовірність появи пластичних деформації при навантаженні 12 МПа дорівнює 0,943. З графіку (рис.9) видно, що при експлуатації 40 років з відповідним

дефектом, поява пластичності спостерігається вже не тільки при максимальному навантаженні у відповідній зоні, а при типовому навантаженні у 6 МПа. При максимальному навантаженні у 12,8 МПа, ймовірність появи пластичності майже дорівнює одиниці, що свідчить про те, що майже при усіх варіаціях розмірів дефектів з'являються пластичні деформації.

**Висновки.** В роботі проведено серію розрахунків криволінійної частини трубопроводу з пошкодженням, що стохастично розвивається при різних термінах експлуатації. На основі отриманих результатів було визначено ймовірнісні характеристики НДС, такі як математичне очікування, коефіцієнт варіації та асиметрії в залежності від внутрішнього тиску та часу який перебуває в експлуатації трубопроводу. На основі цих даних було отримано щільності ймовірностей для різних термінів експлуатації конструкції при відповідних рівнях навантаження. Визначено, що при експлуатації коліна трубопроводу з пошкодженням, яке розвинулось за час експлуатації від 35 до 45 років при максимально можливому навантаженні у всіх відповідних зонах існує ймовірність появи пластичних деформацій відповідно від 0,117 до 0,94, а при типовому навантаженні у 6 МПа при терміні експлуатації від 45 років ймовірність появи пластичності 0,125. Також треба зазначити, що у випадку виникнення значних пластичних деформацій у конструкції, може відбуватись накопичення втомних пошкоджень, що у свою чергу зменшує залишковий ресурс елемента трубопроводу та потребує самостійного вивчення.

#### Список використаних джерел:

1. Побережний Л., Станецький А., Рудко В. Л. Poberezhny, A. Stanetsky, V. Rudko. 2011. P. 20–26.
2. Netto T.A., Ferraz U.S., Botto A. On the effect of corrosion defects on the collapse pressure of pipelines // Int. J. Solids Struct. 2007. Vol. 44, № 22–23. P. 7597–7614.
3. da Costa-Mattos H.S. et al. An alternative methodology to repair localized corrosion damage in metallic pipelines with epoxy resins // Mater. Des. Elsevier Ltd, 2009. Vol. 30, № 9. P. 3581–3591.
4. Chen Y. et al. Failure assessment of X80 pipeline with interacting corrosion defects // Eng. Fail. Anal. Elsevier Ltd, 2015. Vol. 47, № PA. P. 67–76.
5. Valor A. et al. Stochastic modeling of pitting corrosion: A new model for initiation and growth of multiple corrosion pits // Corros. Sci. 2007. Vol. 49, № 2. P. 559–579.
6. Silva R.C.C., Guerreiro J.N.C., Loula A.F.D. A study of pipe interacting corrosion defects using the FEM and neural networks // Adv. Eng. Softw. 2007. Vol. 38, № 11–12. P. 868–875.
7. De Leon D., Macías O.F. Effect of spatial correlation on the failure probability of pipelines under corrosion // Int. J. Press. Vessel. Pip. 2005. Vol. 82, № 2. P. 123–128.
8. Li S.X. et al. Predicting corrosion remaining life of underground pipelines with a mechanically-based probabilistic model // J. Pet. Sci. Eng. Elsevier B.V., 2009. Vol. 65, № 3–4. P. 162–166.
9. Caley F. et al. Probability distribution of pitting corrosion depth and rate in underground pipelines: A Monte Carlo study // Corros. Sci. Elsevier Ltd, 2009. Vol. 51, № 9. P. 1925–1934.
10. Khalaj Khalajestani M., Bahaari M.R. Investigation of pressurized elbows containing interacting corrosion defects // Int. J. Press. Vessel. Pip. Elsevier Ltd, 2014. Vol. 123. P. 77–85.
11. Ma B. et al. Assessment on failure pressure of high strength pipeline with corrosion defects // Eng. Fail. Anal. Elsevier Ltd, 2013. Vol. 32. P. 209–219.
12. Vodka O. Computation tool for assessing the probability characteristics of the stress state of the pipeline part defected by pitting corrosion // Adv. Eng. Softw. 2015. Vol. 90. P. 159–168.
13. Методом М., Елементів С. Дослідження впливу корозійних пошкоджень на напружено-деформований стан сталевих труб магістрального нафтопроводу шляхом моделювання методом скінчених елементів. 2013. Vol. 4, № 39. P. 209–215.
14. Seminar B., Project W. NDT DAYS 2016. 2016. Vol. 1, № 187.
15. Ahammed M. Prediction of remaining strength of corroded pressurised pipelines // Int. J. Pres. Ves. Ki Pq-q. 1997. Vol. 161, № 96. P. 213–217.
16. Larin O., Barkanov E., Vodka O. Prediction of reliability of the corroded pipeline considering the randomness of corrosion damage and its stochastic growth // Eng. Fail. Anal. 2016. Vol. 66. P. 60–71.
17. Cunha D.J.S. et al. Fatigue analysis of corroded pipelines subjected to pressure and temperature loadings // Int. J. Press. Vessel. Pip. Elsevier Ltd, 2014. Vol. 113. P. 15–24.
18. Bazán F.A.V., Beck A.T. Stochastic process corrosion growth models for pipeline reliability // Corros. Sci. 2013. Vol. 74. P. 50–58.
19. Valor A. et al. Reliability assessment of buried pipelines based on different corrosion rate models // Corros. Sci. Elsevier Ltd, 2013. Vol. 66. P. 78–87.
20. Teixeira A.P. et al. Reliability of pipelines with corrosion defects // Int. J. Press. Vessel. Pip. 2008. Vol. 85, № 4. P. 228–237.
21. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. Москва "РАДИО И СВЯЗЬ", 1982. 624 с.

**Грінченко Є.М.**, ст.н.с. науково-дослідної лабораторії захисту інформації та кібербезпеки ХНУВД, к.т.н, доцент.

**Водка О.О.**, доцент кафедри Динаміки та міцності машин НТУ «ХП», к.т.н, доцент.

Стаття надійшла до редакції 21.12.2017