

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ВИБОРУ ПІДХОДІВ ДО РОЗРАХУНКУ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ТРУБОПРОВОДУ ЗА УДАРНОЮ В'ЯЗКІСТЮ

О.М.Карнаш, Н.Л.Тацакович

ІФНТУНГ, 76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 504708

e-mail: nasariy@nung.edu.ua

Наведено аналіз основних підходів до розрахунку залишкового ресурсу трубопроводу за ударною в'язкістю. Розглянуто метод розрахунку за ступенем деградування, швидкістю деградування, критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень та за напруженням руйнування дефекту. На основі проведеного теоретичного дослідження визначено оптимальний метод та вказано шляхи подальших досліджень.

Приведен анализ основных подходов к расчету остаточного ресурса трубопровода по ударной вязкости. Рассмотрено метод расчета по степени деградации, скорости деградации, критическом коэффициенте интенсивности напряжений и по напряжению разрушения дефекта. Основываясь на проведенном теоретическом исследовании определено оптимальный метод и указаны пути следующих исследований.

The analysis of main approaches to the pipeline remaining life assessment by impact strength is described. The assessment methods by degradation factor, degradation rate, critical stress intensity factor and defect failure stress are considered. Based on carried out theoretical investigation the best practice is selected and the next investigation ways are showed.

Однією з важливих науково-технічних проблем сьогодення стає проблема продовження ресурсу безпечного експлуатування потенційно небезпечних об'єктів. До числа таких систем відносять об'єкти нафтової та газової промисловості, зокрема магістральні нафтогазопроводи, основна частина яких відпрацювала 50-75% нормативного ресурсу.

Зростання аварійності на трубопроводах визначило необхідність одночасного прийняття адекватних заходів з виявлення пошкоджень, вивчення металу і розроблення стратегій продовження ресурсу безпечного експлуатування. Для продовження ресурсу проводять спеціальні дослідження, які є обґрунтуванням надійності і безпеки подальшої експлуатації. Існуючі методи розрахунку залишкового ресурсу лежать в області механіки руйнування, а в імовірнісній постановці задачі – в області теорії надійності на основі встановлення (аналітичного або експериментального) основних механічних характеристик матеріалу. Прогнозування залишкового ресурсу за критеріями механіки руйнування вивчене на достатньо високому рівні, у т.ч. для трубопроводів. Однак, актуальною залишається проблема дослідження процесу старіння (деградування) металу і механізмів його впливу на безпечне експлуатування трубопроводу.

Питання динаміки зміни механічних властивостей металу трубопроводів за тривалого експлуатування досліджено у роботах [1, 2, 3, 4]. У них наведено результати експериментів з вивчення зразків металу труб різних магістральних трубопроводів, що вказують на зниження таких властивостей як ударна в'язкість (K_{CV}), в'язкість руйнування (критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{Ic}), відносне попе-

речне звуження та залишкове відносне видовження. Зокрема, за численними експериментальними спостереженнями та дослідженнями залежність ударної в'язкості від часу експлуатування характеризується двома характерними інтервалами. У першому інтервалі ударна в'язкість трубопроводу мало змінюється, у другому – відбувається більш значне її зниження. Перехід між першим і другим інтервалом у більшості випадків залежить від матеріалу і умов експлуатування, тому є індивідуальним для окремого трубопроводу. Проте, незаперечним залишається той факт, що зниження ударної в'язкості відбувається, а ступінь деградування може досягати 30-40% після 20-25 років експлуатування. Слід зазначити, що ударна в'язкість металу труб є механічною характеристикою, мінімальні значення якої залежно від умовного діаметру та робочого тиску регламентуються нормативними документами на трубопроводу, зокрема СНІП 2.05.06-85 [5].

Враховуючи сказане вище, актуальність проблеми дослідження зміни ударної в'язкості у процесі експлуатування трубопроводу та врахування її деградації у розрахунку залишкового ресурсу не викликає сумнівів. Тому, метою цієї роботи є теоретичне дослідження існуючих підходів розрахунку залишкового ресурсу трубопроводу за зміною ударної в'язкості та вибір оптимального з точки зору врахування фактичного технічного стану.

Як правило, моделі деградування ударної в'язкості встановлюють на основі емпіричних залежностей, отриманих за даними періодичних діагностичних обстежень неруйнівними методами або на основі проведення експериментальних досліджень матеріалу труб, зразки для яких виготовлено з вирізаних під час ремо-

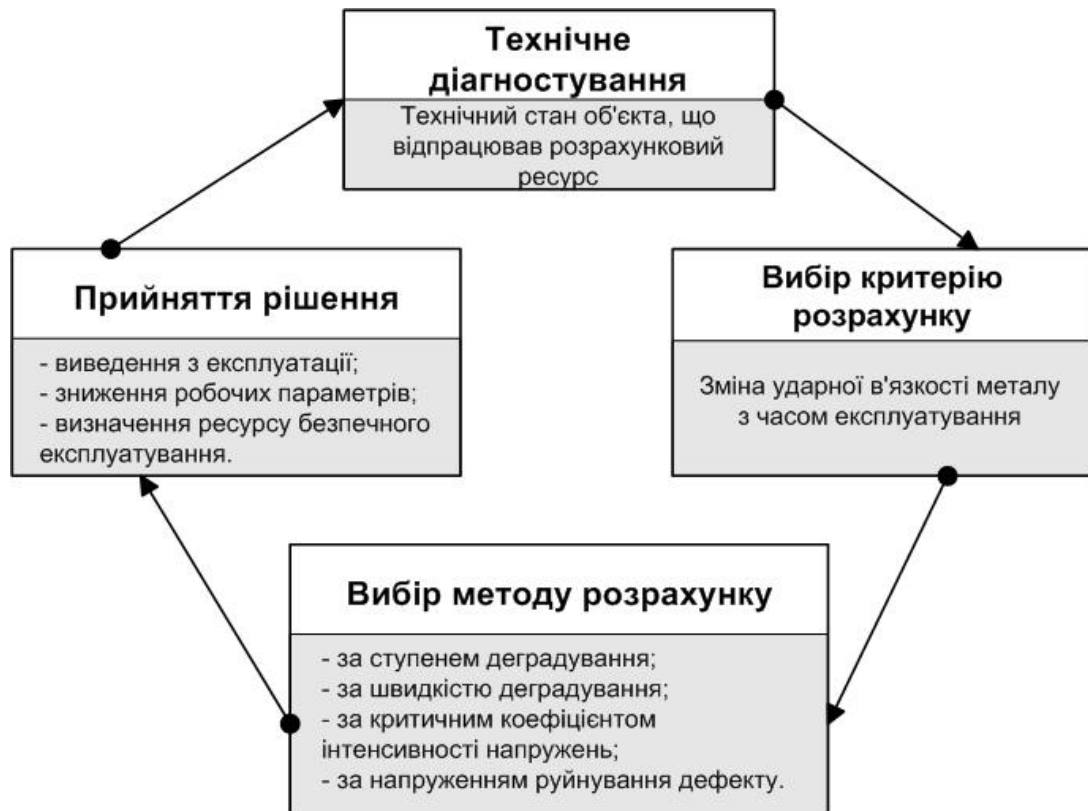


Рисунок 1 – Загальний принцип розрахунку залишкового ресурсу

нтів котушок для різних термінів експлуатації трубопроводу. На основі експериментальних даних будують графічні або табличні залежності механічних характеристик від часу експлуатації. Необхідні значення механічних характеристик на певний, наперед заданий момент часу визначають із апроксимаційної аналітичної залежності або за процедурою екстраполяції. Відповідно, залишковий ресурс трубопроводу, що розраховується за зміною ударної в'язкості металу, є часом від проведення останнього вимірювання до моменту, коли ударна в'язкість досягне мінімально допустимої величини (рисунок 1).

Так, ступінь деградування матеріалу за зміною його ударної в'язкості в процесі експлуатації можна визначити за формулою [3]:

$$C = \frac{KCV_a - KCV_\phi}{KCV_\phi} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де: KCV_a – ударна в'язкість «архівного» металу;

KCV_ϕ – фактична ударна в'язкість матеріалу.

У випадку, якщо зниження ударної в'язкості виявилось менше 5% від нормативного значення, то всі розрахунки залишкового ресурсу проводять за фактичними значеннями характеристики [6].

Якщо зниження величини ударної в'язкості виявилось більше 5% від нормативних значень, то визначають швидкість зниження за формулою (2) і шляхом екстраполяції визнача-

ють ударну в'язкість на кінець очікуваного остаточного періоду експлуатування. Залишковий ресурс розраховують за цими значеннями.

$$a = \frac{KCV_\phi(t_1) - KCV_\phi(t_2)}{(t_2 - t_1)K_1K_2}, \quad (2)$$

де: $KCV_\phi(t_1)$ і $KCV_\phi(t_2)$ – фактична ударна в'язкість, визначена за першого і другого обстеження відповідно, Дж/см²;

t_1, t_2 – час від початку експлуатування до моменту першого і другого обстеження відповідно, роки;

K_1 – коефіцієнт, що враховує відмінність середньої очікуваної швидкості зниження ударної в'язкості (деградування) від гарантованої швидкості зниження;

K_2 – коефіцієнт, що враховує похибку визначення швидкості деградування за лінійним законом.

Значення коефіцієнтів K_1 і K_2 необхідно приймати в межах $K_1 = 0,5 - 0,75$; $K_2 = 0,75 - 1,0$. При цьому більші значення K_1 і K_2 приймають за незначної швидкості зниження ударної в'язкості (до 3% за рік експлуатації), менші значення – при значній швидкості деградування (більше 3% за рік експлуатації).

Цей метод визначення швидкості деградування ударної в'язкості є досить неточним, оскільки сам характер процесу деградування не є лінійним, а змінюється залежно від умов і терміну експлуатування трубопроводу.

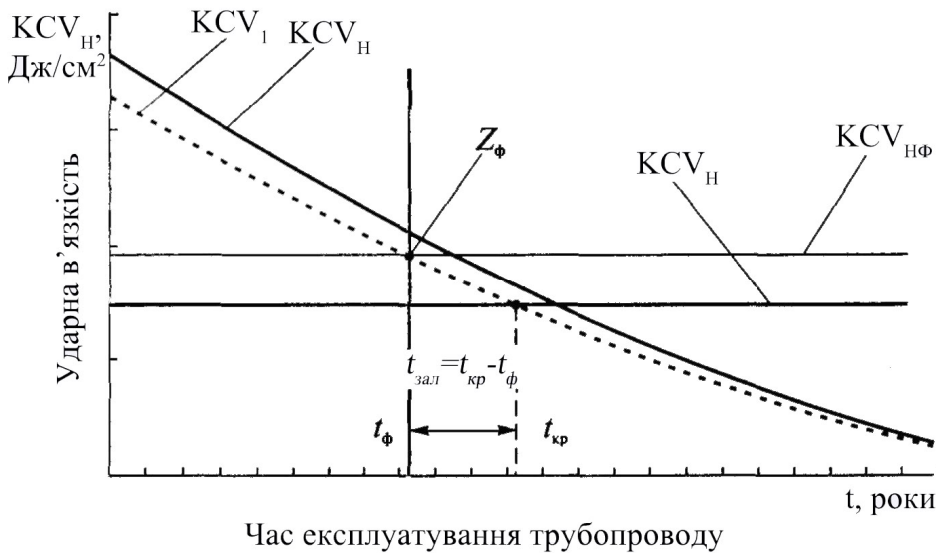


Рисунок 2 – Приклад розрахунку залишкового ресурсу за швидкістю зміни ударної в'язкості

Як приклад розрахунку залишкового ресурсу трубопроводу на основі моделі, що описує зміну ударної в'язкості KCV_n від терміну експлуатування, можна навести такий [7]:

$$KCV_n = \begin{cases} \gamma^2 + \eta t + KCV_{n0}, & 0 \leq t < t_{кр} \\ \mu \exp(-(\lambda t + \beta t^3)), & t \geq t_{кр} \end{cases} \quad (3)$$

де: $\gamma, \eta, \mu, t, \lambda, \beta$ – параметри, що відображають процес деградування відносно вихідного значення ударної в'язкості KCV_{n0} і визначаються на основі наявних експериментальних даних шляхом їх апроксимування та відповідно до критерію подібності процесів деформування і руйнування металів однієї групи;

KCV_{n0} – вихідне значення ударної в'язкості, яке приймається рівним мінімальному нормативному значенню або за даними базового шурфа, Дж/см²;

t – термін експлуатування, роки.

За експлуатування газопроводу в умовах, відмінних від базових, розрахункове значення ударної в'язкості змінюється на величину поправочних коефіцієнтів k_1 і k_2 .

Тоді,

$$KCV_{n\phi} = KCV_{n0} + k_1 + k_2, \quad (4)$$

де $KCV_{n\phi}$ – фактична величина ударної в'язкості в точці вимірювання, Дж/см².

Визначення залишкового ресурсу експлуатування проводять шляхом побудови графіка функції KCV_n , формула (3), з інтервалом точності (-10%) у вигляді двох кривих: KCV_n , формула (3), і KCV_1 – нижньої границі 10%-го інтервалу точності кривої KCV_n в координатах «ударна в'язкість – час» і двох прямих, побудованих в тих же координатах, паралельних осі абсцис: $KCV_n = KCV_{n\phi}$ ($a_{н\phi}$ – мінімально до-

пустиме значення ударної в'язкості), $KCV_n = KCV_{n\phi}$.

Нехай $t_{кр}$ – абсциса точки перетину кривої KCV_1 з прямою $KCV_n = KCV_{n\phi}$. Визначаємо точку перетину $t = t_{\phi}$ і $KCV_n = KCV_{n\phi}$. У випадку, коли вказана точка попадає в інтервал точності функції за (3) або в область над кривою KCV_n , різниця $t_{кр} - t_{\phi}$ дає шукану величину залишкового ресурсу $t_{зал} = t_{кр} - t_{\phi}$. Якщо ж отримана точка виявиться за межами інтервалу точності (в області під кривою KCV_1), необхідно уточнювати параметри, що використовуються у функції (3) або замість t_{ϕ} використовувати для розрахунку умовно-фактичний час експлуатування газопроводу $t_{у\phi}$, який дорівнює абсцисі точки перетину кривої KCV_1 з прямою $KCV_n = KCV_{n\phi}$. У цьому випадку $t_{зал} = t_{кр} - t_{у\phi}$.

Принцип розрахунку залишкового ресурсу за цією моделлю представлено на рисунку 2.

Процес деградування ударної в'язкості матеріалу труб вимагає коректування допустимих робочих параметрів трубопроводів за тривалого експлуатування. Наприклад, у [8] характер взаємозв'язку допустимого робочого тиску і ударної в'язкості описується таким рівнянням:

$$\frac{P_{роб}^2 \cdot \pi \cdot D^3}{8 \cdot E \cdot t} + \frac{P_{роб} \cdot \pi \cdot D^2}{4} \cdot \ln\left(\frac{P_{роб}}{P_0}\right) = t \cdot \zeta, \quad (5)$$

де: D – діаметр труби;

t – товщина стінки;

E – модуль пружності металу;

P_0 – атмосферний тиск;

ζ – питома енергія утворення тріщини (величина, що пропорційна ударній в'язкості).

Важливим чинником в експлуатаванні трубопроводу є виникнення і розвиток різних дефектів, що зумовлюють пошкоджуваність конструкції у процесі експлуатації. Найбільш небезпечним дефектом є тріщина, і за її виявлення виникає питання, проводити терміновий ремонт чи продовжити експлуатацію. Джерелом розвитку руйнування є місця найбільшої концентрації напружень [9].

Експериментальні дані свідчать про те, що за зміни зовнішніх навантажень у значному діапазоні, тріщини якщо і розвиваються, то стабільно до визначеної межі. Для розрахунку на міцність сталевих трубопроводів з тріщиноподібними дефектами застосовують лінійну механіку руйнування. Враховуючи малу зону пластичного деформування перед вершиною тріщини (до 0,5мм) порівняно з довжиною макротріщини, за квазіхрупкого руйнування сталей застосування лінійної механіки руйнування цілком обгрунтоване.

Відповідно до силового критерію тріщина отримує можливість поширення у тому випадку, коли коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) K_I досягає критичної величини $K_{Ic} = const$ – так званої в'язкості руйнування сталі. Отже, умовою непоширення дефекта (умова тріщиностійкості) за плоского деформування у вершині тріщини має вигляд:

$$K_I < K_{Ic}. \quad (6)$$

Напружено-деформований стан у вершині тріщини повністю визначає КІН, що є функцією напруження і геометрії тріщини, і у випадку тріщини нормального відриву визначається за залежністю:

$$K_I = p \cdot F \sqrt{\pi l}, \quad (7)$$

де: p – номінальне нормальне напруження, МПа;

F – поправочна функція, що залежить від схеми навантаження;

l – довжина тріщини.

За відсутності довідкової інформації про K_{Ic} для трубних сталей можна використовувати кореляційні залежності між K_{Ic} і ударною в'язкістю KCV [10].

У разі наявності лише одиничних значень ударної в'язкості KCV можна скористатись консервативним підходом для визначення K_{Ic} , а саме [8]:

$$K_{Ic} = 7,36(KCV)^{0,63}, \quad (8)$$

де розмірність величини K_{Ic} – МПа $\sqrt{м}$, а ударної в'язкості KCV – Дж/см².

Відома кореляція між критерієм в'язкого руйнування в умовах плоского деформування K_{Ic} і ударною в'язкістю за температури верхнього порогу холодноламкості [11]:

$$\left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{0,2}} \right)^2 = 5 \left(\frac{C_V}{\sigma_{0,2}} - 0,05 \right), \quad (9)$$

де: C_V – енергія Шарпі;

$\sigma_{0,2}$ – границя плинності.

У свою чергу у [12] запропоновано рівняння, що пов'язує поглинуту енергію Шарпі з границею плинності та товщиною взірця:

$$C_V = \frac{\sigma_{0,2}}{645} (t + 6,35). \quad (10)$$

У [11] такий взаємозв'язок виражений залежністю:

$$C_V \geq \frac{(\sigma_{0,2})^2}{E} t. \quad (11)$$

За температури в'язко-крихкого переходу і нижче залежність критичного КІН та енергії Шарпі має вигляд [11]:

$$K_{Ic} = 15,5(C_V)^{0,5}. \quad (12)$$

Існує підхід, за якого ударну в'язкість використовують для розрахунку напруження руйнування поздовжньо орієнтованого дефекту. Рівняння для розрахунку напруження руйнування (13) носить назву Ln-Sec або NG 18[13]. Цей підхід можна використовувати для корозійних, стрес-корозійних тріщин або для будь-якого дефекту, для якого зростання може обгрунтовано вважатись лінійним у часі і бути оціненим з достатньою точністю.

$$\sigma_{fs} = \left(\frac{\bar{\sigma}}{M} \right) \left(\frac{2}{\pi} \right) \cos^{-1}(e^{-x}), \quad (13)$$

$$x = \left(\frac{12KCV \cdot E \cdot \pi}{8c\bar{\sigma}^2} \right), \quad (14)$$

де: σ_{fs} – напруження руйнування;

$\bar{\sigma}$ – напруження плинності;

M – фактор деформування Фоліаса, що враховує вплив концентрації напружень дефекту; він є функцією зовнішнього діаметру труби, товщини стінки, глибини і довжини дефекту.

c – половина довжини дефекту;

E – модуль пружності;

KCV – ударна в'язкість.

Отже, фактичний залишковий ресурс трубопроводу дорівнює періоду, коли напруження руйнування дефекту досягне напруження, що виникає під час експлуатації трубопроводу. Таким чином, для прогнозування залишкового ресурсу, використовуючи рівняння Ln-Sec, необхідно визначити швидкість росту дефекту, а також врахувати деградацію ударної в'язкості з часом експлуатації. Такий підхід є найбільш оптимальний з точки зору врахування фактичного технічного стану об'єкта, оскільки враховує фактичну товщину стінки, наявність дефекту та зміну ударної в'язкості з часом експлуатації.

У результаті проведеного теоретичного дослідження проаналізовано підходи до розрахунку залишкового ресурсу трубопроводу за ударною в'язкістю металу. Встановлено, що існуючі методи розрахунку вимагають постійного моніторингу величини ударної в'язкості для встановлення характеру її деградації та гру-

нтуються на руйнівному методі її визначення, що є складним у реалізації. Тому постає необхідність у створенні засобу неруйнівного контролю, який би дав можливість швидко і якісно визначати фактичне значення ударної в'язкості.

Крім того, зміну ударної в'язкості необхідно використовувати для коригування допустимих робочих параметрів трубопроводів за тривалого експлуатування, а також у розрахунках залишкового ресурсу за наявності дефектів у трубах. Найбільш оптимальним підходом визначено розрахунок за рівнянням Ln-Sec з урахуванням у ньому ступеня деградування. Проте, необхідним є проведення експериментальних дослідження цього підходу з використанням неруйнівних засобів визначення ударної в'язкості, а на основі отриманих теоретичних та експериментальних результатів розроблення проекту нормативного документу.

Література

- 1 Старение труб нефтепроводов / А.Г. Гумеров, Р.С. Зайнуллин, К.М. Ямалеев, А.В. Росляков. – М.: Недра, 1995. – 222 с. – ISBN 5-247-03080-X
- 2 Рекомендации по учету старения трубных сталей при проектировании и эксплуатации магистральных нефтепроводов. – Уфа: ВНИИСПТнефть, 1988.- 29с.
- 3 Долгий А.А. Опыт оценки ресурса магистральных трубопроводов, претерпевших длительные эксплуатационные воздействия : материалы Интернет-сторінки / А.А. Долгий, А.Я. Красовский, И.А. Маковецкая, В.М. Тороп. – <http://www.lrt.lv/~diag/rus/ocenka.htm>.
- 4 Бордовский А.М. Восстановление и поддержание сопротивления усталости линейных участков нефтепровода. Труды IV Международного симпозиума по трибофатике (ISTF' 2002: 23–27 сентября 2002 г., Тернополь, Украина). Отв. ред. В.Т. Трощенко. – Тернополь: Тернопольский государственный технический университет имени Ивана Пулюя, 2002. –Т. 1. –530 с.
- 5 Магистральные трубопроводы : СНИП 2.05.06-85*. – [Срок введения в действие 1986 – 01 – 01]. – М. : Госстрой СССР, 1985 – 72с.
- 6 Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов : РД 03-421-01. – [Срок введения в действие 2001 – 09 – 15]. – М. : Госгортехнадзор России, 2001 – 59с.
- 7 Инструкция по диагностированию технического состояния подземных стальных газопроводов : РД 12-411-01. – [Срок введения в действие 2001 – 09 – 15]. – М. : Госгортехнадзор России, 2001 – 50с.
- 8 Зубаилов Г.И. Обеспечение безопасности длительно эксплуатируемых стальных трубопроводов газораспределительных систем : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 25.00.19 “Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ”, 05.26.03 “Пожарная и промышленная безопасность (нефтегазовый комплекс)” / Зубаилов Гаджихамед Исмаилович ; Государственное унитарное предприятие “Институт проблем транспорта энергоресурсов”. – Уфа, 2008. – 28с.
- 9 Работоспособность трубопроводов. Сопротивляемость разрушению. Ч. 2. / Г. А. Ланчиков, Е. Е. Зорин, Ю. И. Пашков, А. И. Степаненко. – М.: Недра, 2001. – 350 с. ISBN 5-247-03080-X
- 10 Визначення залишкової міцності магистральних трубопроводів з дефектами : ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008. – [Чинний від 2009 – 01 – 01]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2008. – IV, 88с.
- 11 Иванцов О.М. Надежность магистральных трубопроводов / О.М. Иванцов, В.И. Харитонов. – М.: Недра, 1978. – 166с.
- 12 Rolfe S.T., Gensamer M., Barsom J.M. Fracture-toughness requirements for steel : proceeding of First Ann. Offshore Technology Conf., Houston, Texas. 19-21 May, 1969.
- 13 Modified Ln-Secant equation improves failure prediction / John F. Kiefner // Oil&Gas Journal. – 2008. – week of Oct. 13. – С.64-66.

Стаття поступила в редакційну колегію
09.02.09