

УДК 519.718

П.Д. СЕСПЕДЕС ГАРСІЯ\*

## ЩОДО ПИТАННЯ ОЦІНКИ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ТРУБОПРОВІДІВ

\*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

**Анотація.** Прогнозування залишкового ресурсу трубопровідної системи може стати цінним інструментом для інженерів-операторів при розробці майбутніх стратегій безпечної експлуатації, плануванні технічного огляду та інспекцій, а також у формуванні ефективного графіка технічного обслуговування. Це дозволить звести до мінімуму ризику відмов трубопровідної системи до моменту завершення очікуваного терміну експлуатації. Однак, з урахуванням великої кількості факторів, що впливають на утворення дефектів різного походження, досягнення точних прогнозів стає складним завданням. Детальна оцінка та прогнозування основних дефектних показників у трубопровідних системах можуть допомогти уникнути виникненню витоків та розривів на об'єкті, зменшуючи ризики аварій та людських жертв. Це також суттєво знижує операційні (експлуатаційні) ризики, що сприяє уникненню матеріальних збитків, включаючи витрати, що можуть бути спричинені масштабною заміною трубопроводу. У цій статті розглядаються основні підходи, описані в нормативних документах, що дозволяють оцінити термін експлуатації, придатність до використання та залишковий ресурс трубопроводів. У результаті роботи досліджено техніку огляду, перевірки та моніторингу об'єкта, обробки та оцінки отриманих даних про дефекти, розрахунку технічних параметрів для оцінки придатності компонентів до подальшої експлуатації, а також інші інженерні рекомендації щодо аналізу об'єкта на деяких етапах його життєвого циклу. На основі проведеної роботи було виявлено, що комплексне використання кількох відносно різних, або навпаки, сумісних нормативних документів, обладнання та програмного забезпечення (враховуючи конкретні потреби та специфікації проєкту) це досить популярна практика, яка дозволяє вдосконалити процес проведення оцінки залишкового ресурсу і дає більш достовірні результати визначення технічного стану об'єкта.

**Ключові слова:** трубопровідні системи, корозія, нормативні документи, залишковий ресурс, продовження терміну експлуатації, придатність до використання.

**Abstract.** Prediction of the pipeline system residual life can be a valuable tool for engineers and operators in developing future strategies for safe application, including planning technical assessment and inspections, as well as the formation of an effective maintenance schedule. This will minimize the risks of pipeline system failures until the expected end of its service life. However, given the large number of factors affecting the formation of defects of different nature, achieving accurate predictions becomes a challenging task. A detailed assessment and prediction of the main defect indicators in pipeline systems can help to prevent leaks and ruptures at the facility, reducing the risks of accidents and human casualties. This also significantly reduces operational risks, which helps to avoid material losses, including expenses that may be caused by large-scale pipeline replacement. This article examines the main approaches described in the commonly used regulatory standards that allow estimating the service life, suitability for use, and residual life of pipelines. In the course of the work, the following techniques have been studied: inspection, facility testing and monitoring, processing and evaluation of the obtained data on defects, calculation of technical parameters for assessing the suitability of components for their further usage, as well as other engineering recommendations for analyzing the facility at some stages of its lifecycle. Based on the work done, it has been found that the complex use of several relatively different or, conversely, compatible regulatory documents, equipment, and software (considering the specific needs and specifications of the project) is a fairly popular practice that allows you to improve the evaluation process of the residual life and provides more reliable results when assessing the technical condition of the facility.

## 1. Вступ

Завдяки регулярному обслуговуванню та інспекціям технічного стану трубопроводів можна вчасно виявляти пошкодження та проводити заходи щодо їх відновлення, але, як показує практика, при тривалій експлуатації всі трубопроводи містять велику кількість дефектів, які є неприпустимими з точки зору галузевих нормативних документів. Оскільки ці дефекти мають властивість погіршуватися та з часом призводити до руйнування, виникає необхідність у прогнозуванні термінів безпечної експлуатації та оцінки залишкового ресурсу. Проте, згідно з нормативними технічними документами, з одного боку, передбачено певний максимальний термін експлуатації трубопроводів, після якого вони потребують заміни на нові. З іншого боку, існують загальні практики продовження терміну служби, які можуть бути застосовані в певних випадках.

Останнім часом з'являється все більше методологічних наукових робіт та галузевих документів, які тим чи іншим чином пов'язані з оцінкою залишкового ресурсу промислових трубопроводів. Автори не завжди вкладають однаковий зміст у термін «залишковий ресурс», інколи мова йде про продовження терміну експлуатації чи оцінювання придатності до служби (за умови збереження початкових вимог до безпеки) об'єкта, який вже вичерпав свій експлуатаційний термін. Ці нормативні технічні документи встановлюють норми, вимоги або характеристики до об'єктів і є важливими інструментами для інженерів та науковців для досягнення оптимального рівня безпеки й ефективної, або навіть подовженої, експлуатації трубопроводів на основі їх поточного стану. Використання цих документів необхідне для визначення процесів та методів щодо проведення професійної оцінки залишкового ресурсу об'єкта, що дозволяє спрогнозувати працездатність, можливість подальшої (збільшеної) експлуатації та необхідність проведення ремонтних та профілактичних робіт до моменту, коли повноцінна заміна буде необхідною. Дотримання цих технічних документів забезпечує безпеку, підвищує термін служби та надійність транспортування рідин і газів, а також зменшує ризик аварій та нещасних випадків. Крім того, відповідність цим документам є важливим критерієм при проведенні професійної оцінки стану трубопроводів.

*Метою статті є загальний огляд найпоширеніших підходів (методів, практик, інструментів, програмних продуктів та спеціалізованого обладнання), що використовуються в актуальних за останні роки нормативних документах, для оцінки залишкового ресурсу та придатності до служби трубопроводних систем.*

## 2. Нормативні документи та відповідні методи для визначення залишкового ресурсу трубопроводів

Для оцінки залишкового ресурсу трубопроводів та прийняття обґрунтованих рішень щодо визначення допустимого терміну їх безпечної та реальної експлуатації (з урахуванням вікових обмежень, механічних пошкоджень та самопливних руйнувань) існують спеціалізовані технічні документи міжнародного, державного, регіонального чи корпоративного рівня, до яких належать стандарти, методики, інструкції, рекомендації та ін. При виборі нормативного документа, слід керуватися принципами, які також передбачають їх узгодження з керівництвом, юридичним, фінансовим та інженерними відділами, для забезпечення повної відповідності документа вимогам всіх сторін і запобігання можливим ризикам у майбутньому.

До таких принципів можна віднести:

- документ повинен відповідати конкретним потребам та специфікаціям проекту, враховувати тип трубопроводу та його умови експлуатації, включаючи вікові характеристики, кліматичні особливості, тип матеріалу, розміри, тиск, температуру та ін.;

- документ має бути визнаним чинним законодавством, підтримуватися і регулярно оновлюватися відповідними організаціями та інститутами;

- документ повинен мати науково-технічну обґрунтованість та відповідати сучасним стандартам і вимогам безпеки;

- в документі мають враховуватися різні джерела даних, такі як результати інспекцій, випробувань, методи моніторингу, даних про експлуатацію та ін., і відповідати конкретним методам оцінки, що базуються на відповідних розрахунках;

- у документі необхідна бути присутня оцінка вартості придбання та подальшого використання документа, а також витрат на навчання персоналу і придбання додаткового спеціалізованого обладнання [1, 2].

Через значне різноманіття інженерних особливостей та специфічних потреб і вимог до безпеки існує значна кількість нормативно-правових документів не тільки на рівні окремих країн, але й іноді в рамках сертифікаційних спільнот, до складу яких можуть входити організації або інститути [3]. У зв'язку з цим, для комплексної оцінки залишкового ресурсу трубопроводів використовуються комбінації декількох нормативних документів, кожен з яких має свої технічні особливості та відповідає окремим фаховим вимогам, що є необхідним для поетапного аналізу та оцінки технічних характеристик.

Приклади документів:

- рекомендовані практики зі збільшення терміну служби трубопроводу [4, 5];
- рекомендації, які максимально охоплюють весь життєвий цикл трубопровідних систем, включаючи проектування, виготовлення, транспортування, монтаж, експлуатацію, технічне обслуговування та інспекцію, а також ліквідацію (зняття з експлуатації та видалення) об'єкта [6, 7];

- рекомендації щодо визначення придатності структурних компонентів до подальшої експлуатації [8];

- процедури огляду, перевірки, оцінки та ремонту трубопровідних систем [9];

- виявлення різних типів корозії, дослідження та оцінка стану з метою визначення їх впливу [10–13];

- оцінка різного виду дефектів у металевих конструкціях [14].

## **2.1. Нормативно-технічна документація**

### **2.1.1. ДСТУ 8646:2016. Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування залишкового ресурсу (терміну служби) технічних систем**

Державний стандарт України ДСТУ 8646:2016 є чинним стандартом та регулює підходи до визначення залишкового ресурсу об'єктів на основі оцінки статистичної інформації про відмови та виміру діагностичних параметрів структурних елементів. Методика стандарту розроблена на основі ймовірно-фізичних моделей відмов, що використовують апріорну інформацію про фізичні процеси деградації об'єктів, які прогнозують залишковий ресурс в умовах малої або навіть відсутньої статистики відмов. Кількісні оцінки показників надійності об'єктів підтверджуються окремими оцінками достовірності, що відповідають отриманим за певні інтервали спостережень статистичним даним [15].

### **2.1.2. ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами**

Державний стандарт України ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008 використовується для визначення залишкової міцності різних ділянок трубопровідної системи, що була в експлуатації або

підлягала ремонту чи випробуванням. У документі встановлені правила для розрахунків коефіцієнтів запасу міцності та довговічності трубопроводів і супутніх з'єднувальних деталей, що містять дефекти, виявлені під час технічного огляду чи діагностичного обстеження. Також стандартом встановлено методику багаторівневої кількісної оцінки дефектів та їх категоризацію за ступенем небезпеки, розрахункові характеристики навантаження на трубопровід і критерії граничних станів. У документі визначені показники допустимого коефіцієнта запасу міцності  $k$  та процедура розрахунку коефіцієнта запасу міцності  $n$ . Виконання умови статичної міцності базується на порівнянні цих коефіцієнтів [16].

Стандарт також реалізує загальні принципи: опорів втоми (показники витривалості); механічних випробувань металів на розтягнення, міцність і механіку руйнування (метод ударного відбитку); визначення характеристик тріщиностійкості при постійному (статичному) навантаженні; корозійного захисту металевих виробів; контролю та визначення технічного стану об'єкта (технічне діагностування).

### **2.1.3. ДСТУ 4046–2001. Обладнання технологічне нафтопереробних, нафтохімічних та хімічних виробництв. Технічне діагностування. Загальні технічні вимоги**

Державний стандарт України ДСТУ 4046–2001 використовується для нафтохімічного технологічного обладнання, газо- і нафтопереробної галузі, яке працює в агресивних, пожежо- та вибухонебезпечних середовищах. Цей нормативний документ використовує практики цілої низки галузевих стандартів, в яких встановлюються методи:

- випробувань та досліджень;
- статистичного опрацювання результатів діагностичних параметрів і можливості визначення рівня залишкової напруженості;
- попередження відмов із подальшим встановленням механізмів і причин їх виникнення та розвитку;
- розрахунків швидкості корозії і оцінки та аналізу порушень працездатного стану під час експлуатації;
- прогнозування технічного стану із встановленням призначеного терміну служби та періодичності контролю;
- профілактики стану резервуарів, трубопроводів та інших технологічних споруд і діагностування механічних характеристик їх матеріалу.

Також стандартом запропоновано декілька специфічних засобів для контролю за об'єктом, неруйнівні методи вимірювання визначальних параметрів відмов, завдяки яким є можливість прогнозування подовжених термінів експлуатації [17].

### **2.1.4. ASME B31G. Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines (пер. з англ.: Керівництво по визначенню залишкової міцності корозійних трубопроводів)**

Міжнародний стандарт був розроблений Американським товариством механіків та інженерів (ASME) і є одним із найчастіше використовуваних стандартів в інженерних та нафтогазових галузях у всьому світі. В документі визначається процедура розрахунку залишкової міцності сталевих трубопроводів, пошкоджених корозією, та оцінка залишкового ресурсу трубопроводів за допомогою спрощених тестів і оцінок за результатами аналізів. Процедура враховує багато чинників, які можуть впливати на міцність пошкодженого трубопроводу, а саме, розміри та форма пошкоджень, тип корозії, напруження, температура та ін. Присутні також формули і таблиці, які дають змогу інженерам проводити розрахунки залишкової міцності трубопроводів за спрощеною методикою на основі результатів інспекцій.

Для оцінки залишкової міцності кородованих трубопроводів запропоновано аналізи 0–3 рівнів, залежно від кількості та якості даних, а також бажаного ступеня деталізації аналізу [18]:

- на 0 рівні використовуються таблиці допустимих характеристик (розмірів) дефектів, що містяться в останньому розділі, і призначені для оцінювання в польових умовах без необхідності виконання детальних обчислень;
- рівень 1 передбачає прості розрахунки на основі одиничних вимірювань максимальної глибини та осевої протяжності (величини) втрати металу і можуть бути проведені в польових умовах особою, яка має відповідну підготовку;
- рівень 2 включає в себе більш деталізований аналіз, ніж рівень 1, для отримання більш точної оцінки тиску руйнування трубопроводу. Він ґрунтується на детальних вимірюваннях корозійної поверхні, враховуючи фактичний розподіл втрат металу, і може бути спрощений за допомогою комп'ютерних програм або електронних таблиць. Оцінку проводить особа з відповідною підготовкою, а результат можна використати для встановлення пріоритетності аномалій втрати металу, виявлених за допомогою спеціалізованого приладу з високою роздільною здатністю. Це може бути здійснено безпосередньо у процесі транспортування робочої рідини через трубопровід (ILI – Pipeline In-Line Inspection, з англ.: Внутрішня Інспекція Трубопроводу);
- оцінка рівня 3 – це детальний аналіз конкретного дефекту відповідно до визначеної користувачем методології з повним обґрунтуванням навантажень, властивостей матеріалу та критеріїв відмов. Оцінка проводиться технічним фахівцем, який має відповідну кваліфікацію в галузі оцінки придатності до експлуатації.

### **2.1.5. DNV-RP-F101. Corroded pipelines (пер. з англ.: Корозійні трубопроводи)**

Det Norske Veritas (DNV) є міжнародним сертифікаційним товариством, яке займається оцінкою, консультуванням та управлінням ризиками. Слід зазначити, що 65% підводних трубопроводів у світі були спроектовані та побудовані з використанням технічних стандартів DNV. Стандарт DNV-RP-F101 – це один із провідних нормативних документів, який встановлює вимоги до проектування, виробництва, інсталяції та експлуатації морських трубопроводів зі сталі. У документі наведені рекомендації та методики щодо оцінки залишкового ресурсу трубопроводів та аналізу впливу корозії та інших чинників на їх стан. Основними описаними методами є два альтернативні підходи для оцінки дефектів корозії, різниця між цими двома підходами полягає в їх філософії безпеки [19]:

- перший підхід включає калібровані коефіцієнти безпеки, які враховують природний розкид властивостей матеріалу, товщини стінок і внутрішні варіації тиску. Невизначеності, пов'язані з розміром дефекту і специфікацією властивостей матеріалу, спеціально враховуються при визначенні опору тиску (пропускної здатності). Для визначення опорної здатності корозійного трубопроводу наведено ймовірнісні калібровані рівняння (з частковими коефіцієнтами безпеки);
- другий підхід базується на форматі розрахунку за допустимим напруженням. Розраховується тиск, при якому відбувається руйнування (за умов наявності корозійного дефекту), і цей показник тиску множиться на єдиний коефіцієнт використання, що базується на початковому проектному коефіцієнті. Врахування невизначеностей, пов'язаних з визначенням розміру дефекту корозії, залишається на розсуд користувача.

### **2.1.6. API 579-1/ASME FFS-1. Fitness-For-Service (пер. з англ.: Придатність до служби (експлуатації))**

Цей документ є комплексним (приблизно 1300 сторінок) узгодженим галузевим стандартом, розробленим спільно з Американським інститутом нафти (API) та Американським

товариством інженерів-механіків (ASME). У документі описується чимало методів оцінки придатності до експлуатації обладнання для продовження роботи протягом деякого бажаного періоду в майбутньому, які використовуються в нафтогазовій, нафтохімічній і хімічній промисловості, що робить його вкрай важливим стандартом у галузі оцінки залишкового ресурсу промислових об'єктів, зокрема, трубопроводів. Документ містить процедури для проведення належної оцінки придатності до експлуатації та переоцінки обладнання, спроектованого та виготовленого відповідно до визнаних норм і стандартів, а також вимоги щодо оцінки залишкового ресурсу трубопроводів та інших промислових об'єктів, які мають дефекти, в тому числі корозійні, механічні та термічні. Документ охоплює як поточну цілісність компонентів з урахуванням поточного стану пошкоджень, так і передбачуваний термін служби, що залишився. Якісні і кількісні рекомендації для встановлення залишкового терміну служби та рекомендації стосовно експлуатаційних меж для продовження експлуатації обладнання надаються щодо майбутніх умов експлуатації та сумісності із навколишнім середовищем. Процедури не призначені для надання остаточних рекомендацій для кожної можливої ситуації, з якою можна зіткнутися, однак користувачеві надається гнучкість у вигляді розширеного рівня оцінки для опрацювання нестандартних ситуацій, які можуть вимагати більш докладного аналізу [20].

У контексті інженерної оцінки та визначення залишкового ресурсу стандарт містить численні розділи, присвячені описанню процедур оцінки впливу механізмів пошкоджень:

- оцінка існуючого обладнання на предмет крихкого руйнування;
- оцінка загальних та локальних втрат металу;
- оцінка точкової корозії;
- оцінка водневого типу пошкоджень НІС і SОНІС [21];
- оцінка відхилень зварних швів і викривлень оболонки;
- оцінка тріщиноподібних дефектів;
- оцінка компонентів, що працюють у діапазоні повзучості;
- оцінка вогневих пошкоджень;
- оцінка вм'ятин, вибоїн і їх комбінацій;
- оцінка розшарування;
- оцінка втомних пошкоджень.

### **2.1.7. ISO/TS 12747:2011. Petroleum and natural gas industries – Pipeline transportation systems – Recommended practice for pipeline life extension (пер. з англ.: Нафтова та газова промисловість – Трубопровідні транспортні системи – Рекомендована практика продовження терміну експлуатації трубопроводів)**

Міжнародна організація зі стандартизації (ISO) пропонує практики для нафтової та газової промисловості, які містять настанови щодо продовження терміну експлуатації трубопровідних транспортних систем після визначеного проектного терміну, з фокусуванням на безперервній, безпечній та надійній роботі. Практики документа зосереджені на оцінці процесу та вимогах до продовження терміну служби, зборі даних про технічне обслуговування та перевірці об'єкта, технічній цілісності та вимогах до відновлення, визначенні загальних загроз для морських та наземних трубопровідних систем [22]. Такий комплексний підхід спрямований на продовження терміну служби трубопровідних транспортних систем і містить у собі:

- оцінку ймовірності, виявлення, розробку стратегій та управління потенційними ризиками;
- встановлення процедур для інспекції та моніторингу даних, виявлення потенційних проблем або збоїв у трубопровідній системі;
- розробку планів технічного обслуговування і ремонту, забезпечення безперервної та безпечної роботи трубопровідної системи;

- оцінку стану трубопровідної системи та її придатності до подальшої експлуатації;
- розробку стратегій боротьби з корозією і захист трубопровідної системи від деградації.

### 2.1.8. NORSOK Y-002. Life extension for transportation systems (пер. з англ.: Продовження терміну експлуатації транспортних систем)

Стандарти NORSOK розроблені Норвезькою нафтогазовою індустрією для забезпечення належного рівня безпеки та економічної ефективності при розробці й експлуатації об'єктів промисловості. В документі “Y-002” враховуються такі важливі фактори, як зміна погодних та кліматичних умов, хімічна агресивність середовища, вібрації, удари, термічні та механічні навантаження. Стандарт містить вимоги та рекомендації з контролю якості та безпеки на всіх етапах життєвого циклу, починаючи із проектування та виготовлення трубопроводу і закінчуючи введенням в експлуатацію та вилученням з неї [23]. Основні вищезазначені процедури, що використовуються у цьому стандарті, детально описують:

- ризик-орієнтований підхід до проектування трубопровідних систем для запобігання порушень у виробництві та зменшення ризику аварій;
- проведення польових та лабораторних випробувань і аналіз властивостей матеріалів, рекомендації щодо їх вибору й використання;
- використання спеціалізованих програм, обладнання та супровідних інструментів для розрахунку параметрів;
  - контроль якості, аналіз відмов, гідравлічні випробування, випробування на міцність та напруження, магнітні та ультразвукові дефектоскопії тощо;
  - рекомендації щодо техніки безпеки при монтажі, експлуатації та ремонту елементів трубопроводу;
  - рекомендації щодо виведення з експлуатації трубопроводів та їх безпечного знешкодження (утилізації).

### 3. Програмне забезпечення

Для проведення технічної оцінки залишкового ресурсу та стану певних видів трубопроводу на основі конкретних видів даних, отриманих з моніторингу, інспекцій та випробувань, зазвичай використовується спеціалізоване програмне забезпечення (ПЗ) й обладнання [1, 2]. Кожна програма має свої переваги й недоліки в контексті різноманітних технічних випадків. Більшість ПЗ призначена для досить специфічних інженерних потреб, тому розробка власного продукту, в якому будуть враховані всі технічні особливості та характеристики конкретного обладнання, є популярною практикою.

Нижче наведено таблицю (табл. 1) лише з декількома прикладами найпопулярніших програмних продуктів та супутніми програмними сервісами, що часто використовуються в галузі для вирішення питань оцінки залишкового ресурсу трубопроводів.

Таблиця 1 – Перелік програмного забезпечення з описом деякого функціонала

Назва продукту – Компанія розробник, додаткові ресурси	Використання галузевих стандартів	Короткий опис деякого функціонала та спеціалізованого обладнання
«RSTRENG» – Technical Toolboxes, допоміжні програмні інструменти для оцінки	ASME/API (Америка), DNV (Норвегія)	Розрахунки ефективної площі та товщини труб; розрахунки залишкової міцності або тиску руйнування;

Продовж. табл. 1

<p>стану трубопроводів: «Pipeline Hub», «Pipeline Toolbox», «API Toolbox» [24] та ін.</p>		<p>визначення корозійного профілю; аналіз залишкового ресурсу та інтервалів повторної оцінки; симуляція ремонту критичних корозійних ділянок</p>
<p>«Ansys» – ANSYS, серія допоміжних модулів для оцінки стану трубопроводів: «ANSYS Mechanical», «ANSYS SpaceClaim», «ANSYS DesignModeler» [25] та ін.</p>	<p>ASME</p>	<p>Універсальна програмна система, що забезпечує доступ практично до будь-якої області інженерного моделювання та аналізу. Популярна у сфері автоматизованих інженерних розрахунків, стаціонарних і нестаціонарних просторових задач механіки деформованого твердого тіла та механіки конструкцій</p>
<p>«Sesam for Pipelines» – DNV, серія допоміжних модулів та сервісів для оцінки стану трубопроводів: «StableLines», «FatFree», «Simbuck» [26] та ін.</p>	<p>DNV, ASME, BS, API</p>	<p>Розрахунковий інструмент для ранньої оцінки морських трубопроводів, що охоплює різні аспекти проектування, оцінку стійкості та аналізу втомного руйнування</p>
<p>«Synergi Pipeline Simulator» – DNV, серія допоміжних модулів та сервісів для оцінки стану трубопроводів: «Leakfinder», «Synergi Gas», «Synergi Liquid» [27] та ін.</p>	<p>DNV, ASME, BS, API</p>	<p>Симуляція роботи трубопроводів; моніторинг, діагностика та прогнозування; моделювання транспорту рідин та газів; аналіз напружень і деформацій; виявлення витоків у реальному часі, визначення їх розміру та місцезнаходження; розрахунок залишкового ресурсу</p>
<p>«Pipecheck» – Creaform, серія допоміжних модулів для оцінки стану трубопроводів: «CORROSION», «DENTING», «WRINKLE ANALYSIS» [28]</p>	<p>ASME</p>	<p>Використовуючи специфічне NDT- (неруйнівний метод контролю) обладнання для 3D-вимірювання та інжинірингу [1], проводиться внутрішня (ILI) інспекція трубопроводу, під час якої відбуваються: виявлення дефектів та механічних або самопливних руйнувань; моделювання і візуалізація результатів аналізу</p>
<p>«Pipeline FFS» – SAVTEQ, допоміжний програмний продукт для роботи з NDT-обладнанням: «3DSL NDT Suite» [29]</p>	<p>ASME</p>	<p>Використовуючи специфічне NDT- (неруйнівний метод контролю) обладнання для 3D-вимірювання та інжинірингу [2], проводиться інспекція трубопроводу, під час якої відбуваються: оцінка технічного стану та розрахунки залишкової міцності; визначення допустимого терміну служби;</p>



Продовж. табл. 1

		моделювання і візуалізація результатів аналізу
«IntegriWISE» – The Welding Institute [30]	API, ASME	Оцінка придатності до експлуатації та цілісності старіючих трубопроводів; розрахунки критичних умов експлуатації; оцінка механізмів пошкодження
«RiskWISE» – The Welding Institute [31]	API, ASME	Управління ризиками та терміном експлуатації; планування інспекцій і технічного обслуговування; оцінка ймовірності та наслідків відмов; ідентифікація місць підвищеного ризику

#### 4. Висновки

Нормативні документи, які стосуються оцінки залишкового ресурсу трубопроводів, розроблені за принципом багатоаспектного процесу, який варіюється в залежності від конкретних завдань, ситуацій та умов експлуатації. У відповідних документах описані методи вимірювання та розрахунку фізичних параметрів для конкретних типів трубопроводів і матеріалів або встановлені вимоги до методик оцінки залишкового ресурсу і економічної ефективності. Основні положення документів складають основу для аналізів і оцінок, наприклад, можливостей збільшення терміну служби, різних форм дефектів, придатності для подальшої експлуатації, стану об'єкта на всіх етапах життєвого циклу, ризиків аварійних ситуацій або навіть взаємодії трубопровідних систем із навколишнім середовищем у контексті кліматичних особливостей. Велика кількість нормативних документів на тему оцінки залишкового ресурсу пояснюється наявністю в галузі різних типів трубопроводів, кожен з яких виготовляється з різних матеріалів, для різних сфер промисловості та умов експлуатації, таких як температурні режими та впливи агресивного навколишнього середовища. Окремою причиною є постійний розвиток технологій виробництва і методів діагностики трубопроводів, адже нові методи і технології повинні враховуватися у стандартах, щоб продовжувати забезпечувати точність аналізів та оцінок об'єкта, тим самим мінімізуючи можливі ризики. Крім того, нормативні документи відрізняються залежно від юрисдикцій, оскільки в різних країнах можуть існувати різні вимоги до безпеки трубопроводів. Програмне забезпечення у цьому контексті є майже обов'язковим інструментарієм для аналізу, вивчення та розрахунків отриманих даних. Особливо, коли мова йде про внутрішній технічний огляд та інспекцію з використанням спеціального обладнання для 3D-вимірювання та інжинірингу, що реалізує неруйнівний метод контролю будь-якої поверхні об'єкта ззовні та всередині.

Для практичних цілей необхідна досить проста, зрозуміла, надійна та ефективна методологія визначення ресурсу трубопроводів із найбільш поширеними та небезпечними пошкодженнями – поверхневими виразковими дефектами. Проте існуючі методи дослідження надійності трубопроводів за умов ерозійно-корозійного зносу (ЕКЗ) часто є детерміністичними (такими, що не враховують випадкову природу цього процесу деградації) або ґрунтуються на суворо ймовірнісних моделях відмов, що призводить до малої кореляції результатів із реальними оцінками залишкового ресурсу об'єктів. Такі методи можуть бути досить орієнтовними, тому що призводять до результатів, які не враховують варіабельність випадкових процесів деградації, що і визначає невисоку достовірність прогнозування залишкового ресурсу на їх основі.

Також видається актуальним завдання оцінювання залишкового ресурсу трубопроводів при їх тривалій експлуатації з використанням імовірнісно-фізичного підходу до оцінки довговічності трубопроводів (згідно з ДСТУ 8646:2016) із використанням імовірнісних моделей (дифузійних DN та DM-розподілів відмов), параметри яких мають фізичну інтерпретацію у вигляді середньої швидкості зміни визначального параметра (критерію придатності) та коефіцієнта варіації узагальненого процесу деградації.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. HandySCAN 3D | Professional Portable Metrology-Grade [3D Laser Scanner]. URL: <https://www.creaform3d.com/en/portable-3d-scanner-handyscan-3d>.
2. SAVTEQ | 3DSL Rhino. URL: <https://www.savteq.com/3dsl-rhino>.
3. API | Global Standards. URL: <https://www.api.org/products-and-services/standards/global-standards>.
4. ASME B31.4. Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries. URL: <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/b31-4-pipeline-transportation-systems-liquids-slurries>.
5. ASME B31.8. Gas Transmission and Distribution Piping Systems. URL: <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/b31-8-gas-transmission-distribution-piping-systems>.
6. CSA Z184. Gas Pipeline Systems. URL: [https://global.ihs.com/doc\\_detail.cfm?document\\_name=CSA%20Z184&item\\_s\\_key=00131227](https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=CSA%20Z184&item_s_key=00131227).
7. CSA-Z662. Oil & Gas Pipeline Systems. URL: [https://global.ihs.com/csa\\_z662\\_oil\\_and\\_gas\\_pipelines.cfm](https://global.ihs.com/csa_z662_oil_and_gas_pipelines.cfm).
8. API RP 579. Fitness-for-Service. URL: <https://www.stress.com/services/energy/downstream/primary-services/api-579-fitness-for-service-assessments/>.
9. API 570. Piping Inspection Code. URL: [https://global.ihs.com/doc\\_detail.cfm?document\\_name=API%20570&item\\_s\\_key=00157809](https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=API%20570&item_s_key=00157809).
10. ASTM G46-94. Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion. <https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmg46942018>.
11. NACE RP0502. Pipeline External Corrosion Direct Assessment Methodology. URL: <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/004/nace.rp0502.2002.pdf>.
12. NACE SP0206. Standard Practice Internal Corrosion Direct Assessment Methodology for Pipelines Carrying Normally Dry Natural Gas. URL: [http://www.opimsoft.com/download/reference/NACE%20SP0206-2006%20\(DG-ICDA\).pdf](http://www.opimsoft.com/download/reference/NACE%20SP0206-2006%20(DG-ICDA).pdf).
13. NACE SP0208. Standard Practice Internal Corrosion Direct Assessment Methodology for Liquid Petroleum Pipelines. URL: [http://opimsoft.com/download/reference/NACE%20SP0208-2008%20\(LP-ICDA\).pdf](http://opimsoft.com/download/reference/NACE%20SP0208-2008%20(LP-ICDA).pdf).
14. BS 7910. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. URL: <https://www.en-standard.eu/bs-7910-2019-guide-to-methods-for-assessing-the-acceptability-of-flaws-in-metallic-structures/>.
15. ДСТУ 8646:2016. Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування залишкового ресурсу (терміну служби) технічних систем. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=93146](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=93146).
16. ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008. Магістральні трубопроводи. Настанова. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=45882](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=45882).
17. ДСТУ 4046–2001. Обладнання технологічне нафтопереробних, нафтохімічних та хімічних виробництв. Технічне діагностування. Загальні технічні вимоги. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=65778](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=65778).
18. ASME B31G. Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines. URL: <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/b31g-manual-determining-remaining-strength-corroded-pipelines>.
19. DNV-RP-F101. Corroded pipelines. URL: <https://www.dnv.com/oilgas/download/dnv-rp-f101-corroded-pipelines.html>.
20. API 579-1/ASME FFS-1. Fitness-For-Service. URL: <https://www.asme.org/learning-development/find-course/api-579-1-asme-ffs-1-fitness-service-evaluation/online--jul-10-12th--2023>.

21. What is Hydrogen Induced Cracking – HIC and SOHIC. URL: <https://www.piping-world.com/what-is-hydrogen-induced-cracking>.
22. ISO/TS 12747:2011. Petroleum and natural gas industries – Pipeline transportation systems – Recommended practice for pipeline life extension. URL: <https://www.iso.org/standard/51657.html>.
23. NORSOK Y-002. Life extension for transportation systems. URL: <https://standards.globalspec.com/std/14395827/Y-002>.
24. Products – Technical Toolboxes. URL: <https://technicaltoolboxes.com/products/>.
25. Engineering Simulation Software | Ansys Products. URL: <https://www.ansys.com/products#t=ProductsTab&sort=relevancy&layout=card>.
26. Software modules for strength and fatigue analysis of pipelines – Sesam for pipelines. URL: <https://www.dnv.com/services/sesam-for-pipeline-modules-2481>.
27. Pipeline simulator and surge analysis software – Synergi Pipeline Simulator – DNV. URL: <https://www.dnv.com/software/services/pipeline/synergi-pipeline-simulator-modules.html>.
28. NDT oil and gas pipeline inspection solution. URL: <https://www.creaform3d.com/en/ndt-solutions/ndt-pipeline-inspection-oil-and-gas-industry>.
29. SAVTEQ | Software. URL: <https://www.savteq.com/software>.
30. IntegriWISE™ – API 579. Fitness for service (FFS) software. URL: <https://www.twisoftware.com/software/integrity-management-software/integriwise/>.
31. RiskWISE® – API 581. Risk Based Inspection (RBI) software. URL: <https://www.twisoftware.com/software/integrity-management-software/riskwise-for-pipelines/>.

*Стаття надійшла до редакції 01.03.2023*