

## ЗАГАЛЬНІ ЗАСАДИ ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ НАФТОГАЗОВОЇ ГАЛУЗІ

**Я. М. Семчук, О. В. Кривенко, Г. Д. Лялюк-Вітер, Г. М. Кривенко**  
*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;  
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;  
тел. +38(0342)72-71-58; e-mail: bzhd@nung.edu.ua*

*В нафтогазовій галузі функціонують різноманітні об'єкти підвищеної небезпеки, серед яких трубопровідні системи займають провідне місце завдяки певній специфіці (конструктивній, технологічній, умов експлуатації, тощо).*

*Розгалужені на значній території трубопровідні системи характеризуються високим рівнем ризику створення нештатних ситуацій. Тому аналіз ризику виникнення аварій або відмов, суть якого полягає в ідентифікації небезпек та оцінці можливостей їх проявів, складає значну частину системи керування промисловою безпекою технічних систем (ТС) [1]. Одним з головних завдань цієї системи є запобігання можливості виникнення аварії та відмов, тобто забезпечення надійності. Автори розглядають важливість оцінки надійності об'єктів підвищеної небезпеки, як при їх введенні в експлуатацію, так і протягом її перебігу. Зазначено, що керування надійністю системи на стадії експлуатації може здійснюватися шляхом визначення оптимально допустимих відхилень структурних параметрів технічного стану та іншими заходами. У статті надається огляд основних кількісних показників надійності, таких як функція надійності та «функція ненадійності», і розглядається їх значення у визначенні імовірностей відмов та зниження напрацювання до відмови. Детально розглядаються зміни інтенсивності відмов відповідно до розподілу Вейбулла та експоненціального закону розподілу. Показники безвідмовності для невідновлювальних систем включають імовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов та середнє напрацювання на відмову, а показники ремонтпридатності для відновлювальних систем – це імовірність відновлення та середній час відновлення. Комплексний показник надійності відновлювальних систем визначається через коефіцієнт оперативної готовності. У висновках статті висвітлюється важливість використання статистичних даних та показників надійності для оцінки систем та компонентів, зокрема нафтопровідних та газотранспортних систем Європи, які мають значуще значення для промислової безпеки та надійності технічних об'єктів.*

***Ключові слова:** відмова, надійність, прогнозування, ризик, складні технічні системи, трубопровідний транспорт.*

**Вступ.** Оцінка (прогнозування) надійності об'єктів підвищеної небезпеки повинна проводитись як при введенні їх в експлуатацію, так і протягом її перебігу з метою декларування їх безпечності, а також підтримання експлуатаційної ефективності (здатності повною мірою виконувати своє функціональне призначення з врахуванням техніко-технологічних, економічних та інших чинників).

Прогнозування технічного стану чинного об'єкту важливе також з точки зору оцінки його надійності в процесі подальшої експлуатації з врахуванням екологічних, соціальних та економічних аспектів, які постають у разі виникнення нещасних випадків, відмов, аварійних ситуацій, аварій, пожеж, тощо.

Надійність – це властивість об'єкта зберігати у часі в установлених межах всі параметри, які характеризують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах чи умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання чи транспортування.

Керування надійністю системи на стадії експлуатації можна здійснювати визначаючи оптимально допустимі відхилення структурних параметрів технічного стану, змінюючи міжконтрольні напрацювання між відмовами, зменшуючи середню швидкість зміни параметрів стану, тощо.

Керування надійністю і технічним станом в процесі експлуатації нафтогазотранспортних систем (НГТС) полягає у забезпеченні високого (оптимального) прогнозованого рівня працездатності об'єкта (системи) з метою зниження частоти відмов та підтримання заданого рівня безпеки за умов допустимих матеріальних та фінансових витрат.

Надійність СТС залежить не тільки від її схеми та технічних характеристик, а й значною мірою від режимів експлуатації, технології виробництва, масштабності та якості контролю параметрів системи та довілля.

Для оцінки надійності приладів та СТС використовуються поняття відмови, дефекту, граничного стану та інші, а також застосовують відповідні методи їх розрахунку.

Відмова – це порушення працездатності технічного об'єкта внаслідок неприпустимих змін його параметрів або властивостей під дією фізико-хімічних процесів, зовнішніх механічних, кліматичних та інших впливів.

Внаслідок відмови об'єкт набуває несправного стану, при якому іноді ще може зберігатися його працездатність. Власне цим відмова відрізняється від аварії.

Відмови можуть бути різних видів: залежно від характеру їх виникнення, прояву, локалізації та інших ознак (повна-часткова, критич-

на-катастрофічна). Необхідно розрізняти відмови від ушкоджень, за наявності яких об'єкт чи система зберігає працездатність.

**Аналіз попередніх досліджень.** Розв'язанню прикладних задач трубопровідного транспорту нафти й газу у зв'язку з прогнозуванням надійності трубопровідних систем присвячено цілий ряд робіт провідних учених нафтогазової галузі. Серед наукових праць вітчизняних авторів, які найбільше досліджували та висвітлювали проблеми надійності газопровідних систем слід відзначити напрацювання: Бонахевича Ю.В., Говдяка Р.М., Грудза В.Я., Ковалка М.П., Крижанівського Є.І., Тимківа Д.Ф., Степ'юка М.Д. та багатьох інших [2-6].

З позиції безпечності СТС найважливішими можна вважати критичні (катастрофічні) відмови, до яких відносять відмови в технологічному устаткуванні об'єкта або помилки персоналу об'єкта, що призводять до появи передумов виникнення аварії [5].

Аналіз наукових джерел та теперішньої ситуації в державі показує, що є нагальна потреба у вивченні загальних засад прогнозування надійності та безпечності СТС нафтогазової галузі.

**Метою статті** є дослідження загальних засад прогнозування надійності СТС нафтогазової галузі. Для досягнення даної мети необхідно провести оцінку показників довговічності та показників надійності систем відносно відповідних критичних відмов.

**Виклад основного матеріалу.** Логічний процес розвитку небезпеки СТС можна відображати наступною послідовністю: «зниження надійності → зростання числа відмов → підвищення небезпеки → збільшення ризику виникнення небажаної події → прояви небажаної події».

У зв'язку з тим, що в експлуатації та управлінні СТС часто бере участь людина (персонал), яка нерідко є “слабкою” ланкою в системі, при вирішенні проблем надійності СТС потрібно врахувати комплекс факторів не тільки технічного, інформаційного, екологічного, а також психофізіологічного характеру. Тобто властивості СТС повинні розглядатися з позицій функціонування комплексних систем “техніка-людина – навколишнє середовище”, з виділенням комплексних характеристик, які враховують взаємодію людини з машиною за умов певного навколишнього середовища з одночасним забезпеченням виконання цивільної задачі. Тільки такі показники дають можливість отримати найбільш повну характеристику якості та експлуатаційних властивостей технологічної системи. Серед них слід назвати характеристики надійності, безпечності, живучості, готовності до застосування, ефективності та інші.

Оцінку кількісних властивостей СТС звичайно дають з допомогою чисельних характеристик (показників). Їх величини, як правило, мають випадковий характер і тому для їх оцінки використовують закони розподілу або чисельні характеристики цих законів. З цією метою

також використовують показники, які відображають імовірність перевищення певного рівня або гарантованого значення, яке випадкова величина, що вибрана як показник якості ТС, перевищить або не досягне з заданою ймовірністю.

Виникнення відмов або досягнення граничного стану в СТС може супроводжуватись декількома ознаками прямого або побічного характеру. Критеріями відмов виробу є ознаки непрацездатного стану, які встановлюються нормативними документами та конструкторською документацією. Для визначення граничного стану виробу вибирають ознаки, що здатні забезпечити найбільшу простоту їх визначення та достовірність.

Неможливість подальшої експлуатації виробу може бути спричинена відмовою, яку неможливо усунути за умов експлуатації, або відпрацюванням виробом визначеного ресурсу. Це рішення може прийматись із урахуванням технічних і економічних міркувань.

Ознаками граничного стану виробу, а тим більше СТС, можуть слугувати граничні стани його (її) складових елементів при досягненні ними граничного напруження.

Надійність, що закладається при проектуванні, конструюванні та виробництві в процесі експлуатації тільки зменшується.

Існують способи підтримки надійності на певному рівні. До них входять заходи з технічного обслуговування, відновлення та ремонту виробу або СТС, але їх застосування не в змозі перевищити первинний рівень надійності [6].

Втрата надійності СТС збільшує загрозу появи небезпеки, перевищення прийнятого рівня якої вимагає припинення його експлуатації.

Виникнення відмов, а тим більше аварій, потребує залучення відповідного персоналу для виявлення причин їх появи, локалізації можливих наслідків, виконання ремонтно-відновлювальних робіт тощо. Ризики, що виникають в процесі цих дій, значно вищі, ніж при роботі системи впродовж “штатного” режиму. Це підтверджується статистикою виробничого травматизму в усіх галузях господарювання.

Розглядаючи питання надійності трубопровідних систем, слід розрізняти її конструктивно-технічну та експлуатаційну складові. Остання має безпосередній зв'язок з безпечністю її функціонування, а також з промисловою безпекою та охороною праці.

Головна вимога до трубопровідних систем з точки зору безпечної експлуатації – це зберігання герметичності та конструкційної цілісності протягом усього терміну експлуатації. Тому будь-який випадок порушення герметичності трубопроводу повинен розцінюватися як відмова. Для газопроводу поява свища або тріщини розглядається як критична відмова. Ця умова не є обов'язковою для нафтопроводу, якщо він пролягає в малонаселеній місцевості (у цьому разі відмову можна вважати некритичною).

Головними показниками надійності та довговічності СТС є імовірність безвідмовної роботи (або, навпаки, імовірність відмов), напрацювання до першої критичної відмови, середній ресурс, імовірність відновлення, середній час відновлення. Серед комплексних показників надійності використовують коефіцієнт готовності, або коефіцієнт технічного використання.

При проведенні системного аналізу надійності трубопровідної траси використовують також такі показники, як середнє напрацювання на відмову, середній параметр потоку відмов та імовірність відновлення.

Основними показниками довговічності є середній ресурс (календарний строк експлуатації ТС). Ресурс трубопроводу визначається як напрацювання від початку його експлуатації або відновлення після ремонту до переходу в граничний стан.

Розрізняють назначений ресурс та ресурс залишковий. До першого відносять сумарне напрацювання трубопроводу, при досягненні якого експлуатація його повинна бути припинена з міркувань безпеки або економічної доцільності. Залишковий ресурс – це сумарне напрацювання трубопроводу від моменту контролю його якості до переходу в граничний стан.

Аналіз надійності СТС полягає в оцінці показників надійності систем відносно відповідних критичних відмов.

Технічна та функціональна надійність трубопровідних систем, що використовуються в процесах видобування нафти й газу, транспорту чи розподілу нафти, нафтопродуктів або газу, пов'язані із забезпеченням постачання планових обсягів відповідної продукції замовнику за умов оптимізації економічних показників, мінімізацією втрат продукту та забезпеченням промислової безпеки.

В процесі аналізу показників системної надійності повинні розглядатись технічні та експлуатаційні можливості складових елементів системи, частота відмов.

У свою чергу аналіз відмов полягає у виконанні відповідних розрахунково-аналітичних процедур, потрібних для встановлення та прогнозування причинно-наслідкових зв'язків, притаманних певній відмові. Розрахунок показників надійності та довговічності звичайно пов'язується з дослідженням розвитку (еволюції) дефектів та ушкоджень системи в процесі її експлуатації за умов передбачених (проектних) та випадкових навантажень і впливів. Головним джерелом інформації про наявність та динаміку розвитку дефектів ТПС є засоби внутрішньотрубної діагностики та обстеження розкритої поверхні трубопроводу (візуально або з використанням відповідних приладів контролю).

Кількісні показники надійності можуть мати загальнотехнічний або спеціалізований характер; наприклад, для трубопровідних систем чи їх елементів. Вони використовуються для порівняльної оцінки окремих властивостей у залежності від мети аналізу та об'єкта дослідження.

Будь-яка технічна система є працездатною за умов відповідності головних параметрів значенням, які забезпечують функціонування системи. Зміну у часі параметрів, що відображають технічний стан системи, можна характеризувати функцією надійності, яка відображає імовірність того, що випадкове напруження до відмови  $t$ , буде не нижче заданого напруження  $T$ , що відраховується від початку експлуатації. Тобто,

$$p(t) = p(t \geq T), \quad (1)$$

де  $p(t)$  – часова функція, яка відображає зміну імовірності відсутності відмов системи.

Поряд з функцією надійності можна визначати зворотною “функцію ненадійності”  $q(t)$ , як

$$q(t) = 1 - p(t), \quad (2)$$

яку ще можна інтерпретувати як імовірність зниження напруження менше заданої величини  $T$ .

Зміни у часі цих функцій наведені на рис.1.

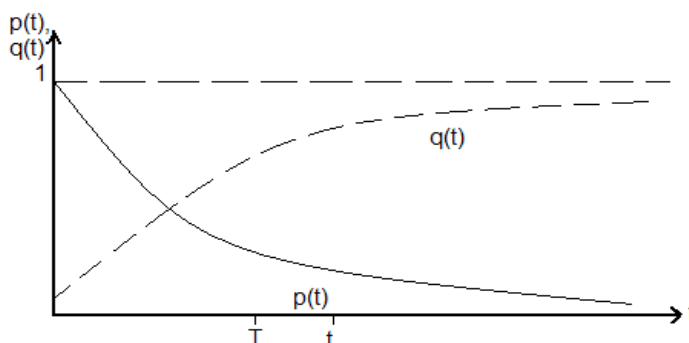


Рис. 1. Залежність функцій надійності та ненадійності від напруження  $t$

Таким чином, функція надійності – це залежність від напруження імовірності відсутності відмов від початку експлуатації ( $t=0$ ) до заданого часу напруження ( $T$ ).

Інтенсивність відмов реальних не відновлювальних об’єктів змінюється у часі, як це показано на рис. 2

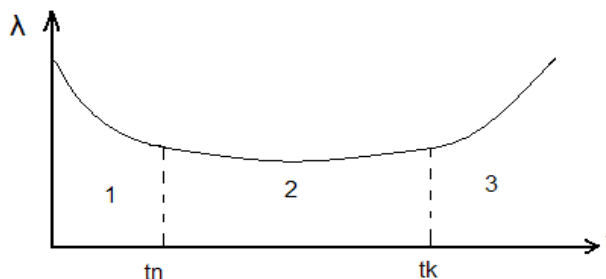


Рис. 2. Інтенсивність відмов реального об’єкта

Ділянка 1 впрацювання може бути описана розподілом Вейбулла, ділянка нормальної експлуатації 2 – експоненціальним законом розподілу напрацювання до відмови з постійною інтенсивністю відмов  $\lambda(t)=\lambda=\text{const}$ , а ділянка 3 (старіння) – нормальним гамма-розподілом чи розподілом Вейбулла.

При статистичних оцінках значення функції надійності користуються виразом:

$$\tilde{p}(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_t}{N}, \quad (3)$$

де  $N$  – число випробуваних об'єктів;  $N_t$  – число справних об'єктів під час статистичних випробувань;  $\tilde{p}(t)$  – усереднене значення функції  $p(t)$ .

Аналогічно визначається основний показник безпечності – ризик виникнення небажаних подій як відношення подій, що відбулося ( $N_{\text{нп}}$ ), до загально можливого числа цих подій ( $N_{\text{max}}$ )

$$R = \frac{N_{\text{нп}}}{N_{\text{max}}}, \quad (4)$$

Викладене дає можливість зробити висновок, що при досягненні функцією ненадійності значень, що відповідають межі критичного ризику за надійністю і (або) безпечністю, повинно виникати питання подальшої експлуатації ТС. У цьому випадку йдеться про повні, критичні та катастрофічні відмови, а також досягнення системою граничного стану.

Таким чином, легко помітити повну змістовну аналогію між критеріальними поняттями «ризик виникнення небажаних подій» (в охороні праці та промисловій безпеці) та «імовірне зниження напрацювання до відмови» (в техніці). Ці обставини дозволяють також говорити про спільність наукових та методологічних засад, які покладені в основу визначення показників надійності та безпечності СТС, та їх використання в оцінці ресурсу технічних систем, а також аналізі та прогнозуванні стану промислової безпеки технічних об'єктів та споруд.

Аналіз аварійності на об'єктах підвищеної небезпеки, а відтак стану промислової безпеки, а також причин виробничого травматизму підкреслює тісний зв'язок надійності об'єктів з охороною праці. Як відомо, на долю технічних причин припадає до 8-10% від загальної кількості травм, отриманих на виробництві.

Серед причин, що найчастіше повторюються, відмов лінійної частини, магістральних трубопроводів є брак зварних з'єднань при виконанні будівельно-монтажних робіт, різноманітні механічні ушкодження в процесі будівництва чи експлуатації, стихійні лиха (землетруси, повені, зсуви ґрунту та ін.). До них також слід віднести причини пов'язані з розвитком дефектів матеріалу труб та зварювальних швів під впливом корозійних, біокорозійних, корозійно-механічних та інших процесів.

До різних елементів трубопровідних систем застосовуються відповідні моделі та методи оцінки технічного стану та визначення показників надійності.

Показники, що застосовуються для аналізу надійності СТС, можуть мати комплексний характер. Тоді вони є носіями інформації про сукупність окремих властивостей. В окремих випадках користуються показниками надійності, які дають оцінку лише якоїсь певної властивості (безвідмовність, ремонтпридатність тощо).

З математичної точки зору функціонування СТС та її об'єктів можна описати випадковими процесами, окремі властивості яких характеризують випадковими величинами. Показники надійності СТС є числовими характеристиками цих процесів та величин.

Аналіз відмов загально технічних систем (в тому числі засобів безпеки) показує, що відмови мають переважно раптовий характер, але зустрічаються випадки відмов поступового характеру. Останні пов'язані з процесами старіння, корозії або зносу деталей, проявами втоми матеріалу конструкцій тощо.

Імовірність безвідмовної роботи часто підпорядковується експоненціальному розподілу. Час розподілу безвідмовності, при поступових відмовах частіше підпорядковується нормальному закону.

Для характеристики та оцінки надійності СТС використовують показники безвідмовності для невідновлювальних систем та показники ремонтпридатності для систем відновлювальних.

До показників безвідмовності належать:

– імовірність безвідмовної роботи,  $P(t)$ ;

$$P(t) = 1 - Q(t), \quad (5)$$

де  $Q(t)$  – функція розподілу випадкової величини часу нормованого функціонування об'єкту (напрацювання),  $t$  – напрацювання або час роботи до відмови;

$\lambda(t)$  – інтенсивність відмов – умовна густина імовірності відмов до моменту  $t$ , якщо до моменту  $t$  відмов не було:

$$\lambda(t) = -\frac{d \ln P(t)}{dt}; \quad (6)$$

– середнє напрацювання на відмову – математичне очікування часу напрацювання до першої відмови,  $T$ :

$$T = \int_0^{\infty} t dQ(t). \quad (7)$$

Потік відмов є найпростішим та стаціонарним. Тому функція середнього часу безвідмовності  $T$  дорівнює:

$$T = \frac{1}{\lambda}, \quad \text{а} \quad \lambda = \frac{1}{T}. \quad (8)$$



Показники ремонтпридатності характеризують здатність системи до усунення відмов шляхом застосування ремонтів та технічного обслуговування.

Для оцінки цієї властивості системи використовують подібні імовірнісні показники: імовірність відновлення  $\mu(t)$  та середній час відновлення ( $\theta$ ).

Комплексним показником надійності відновлювальних систем є коефіцієнт оперативної готовності  $K_{ог(t)}$  – імовірність того, що система буде працездатною у довільний час  $t$  і безвідмовно відпрацює час  $t$ .

Імовірність часу безвідмовної роботи часто підпорядковується експоненціальному розподілу Пуассона [5].

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (9)$$

Щодо характеристик поступових можливих відмов, то частіше вони описуються Гауссівським розподілом випадкових величин. У цьому разі загальний вираз функції щільності розподілу має наступний вигляд:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}, \quad (10)$$

або функція розподілу:

$$F(x) = 0,5 + \frac{1}{2} \Psi\left(\frac{x-a}{\sigma\sqrt{2}}\right), \quad (11)$$

де  $\Psi = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$  – додаткова табульована функція помилок, де

$t = \frac{x-a}{\sigma\sqrt{2}}$  – нова змінна,  $a$  – математичне очікування випадкової величини;

$\sigma$  – середньоквадратичне відхилення;  $x$  – перервна випадкова величина [6].

### Висновки.

Більшість показників надійності СТС оцінюється на основі статистичних даних за методиками, що регламентовані відповідними нормативними документами. Очевидно, що достовірність отриманих результатів та прийнятих на їх основі практичних рішень буде залежати від обсягу статистичної вибірки. У зв'язку з досить малим числом тяжких аварій на трубопровідних системах оцінка імовірності їх виникнення є проблематичною. Тому для розширення бази даних з перспективою її використання в майбутньому вважаємо доцільним використовувати увесь доступний статистичний матеріал з аварійності трубопровідних систем, особливо таких як нафтопровідна і газотранспортна системи Європи. Тим більше, що вони у переважній більшості випадків запроєктовані, побудовані та експлуатуються на підставі спільної або ідентичної нормативної та науково-технічної бази.

*Література*

1. Міжнародний стандарт ISO 45001 – Менеджмент системи професійного здоров'я та безпеки URL: <https://www.iso.org/ru/news/ref2271.html>.
2. Грудз В.Я., Тимків Д.Ф., Михалків В.Б., Костів В.В. Обслуговування і ремонт газопроводів: монографія. Івано-Франківськ: “Лілея – НВ”, 2009. 712 с.
3. Говдяк Р.М., Коснирєв Н.М. Кількісний аналіз аварійного ризику газотранспортних об'єктів підвищеної небезпеки. Львів: “Кальварія”, 2007. 158с.
4. Костянян В.Р., Горобинський С.В. Визначення ризиків виникнення нештатних ситуацій на технологічних об'єктах газотранспортної системи. *Нафтова і газова промисловість*. 2011. №3. С.50-53.
5. Радецький Й.І., Горобинський С.В., Костянян В.Р., Удосконалення системи управління безпеки виробництва підприємств нафтогазового комплексу. *Нафтова і газова промисловість*. 2012. №6. С. 16-20.
6. Герасименко Ю. М. Методика моніторингу стану промислової безпеки ГТС. *Трубопровідний транспорт*. 2011. С. 4-6.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 31.10.2023 р.*

**GENERAL PRINCIPLES OF FORECASTING THE RELIABILITY  
OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS IN THE OIL  
AND GAS INDUSTRY**

**Ya. Semchuk, O. Kryvenko, H. Lialiuk-Viter, G. Kryvenko**

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;*

*76019, Ivano-Frankivsk, Carpatska st., 15;*

*ph. +380 (0342) 72 71 58; e-mail: bzhd@nung.edu.ua*

*In the oil and gas industry, various high-risk facilities operate, among which pipeline systems occupy a leading position due to their specific characteristics (structural, technological, operational conditions, etc.).*

*Pipeline systems, distributed over a large area, are characterized by a high level of risk of emergencies. Therefore, the risk analysis of accidents and failures, the main essence of which is to identify hazards and assess the possibility of their occurrence, is a crucial part of the industrial safety management system of technical systems (TS) [1]. One of the main tasks of this system is to prevent the possibility of accidents and failures, i.e., to ensure reliability. The authors emphasize the importance of assessing the reliability of high-risk objects, both when put into operation and during their operation. It is noted that reliability management during the operation stage can be carried out by determining the optimal allowable deviations of structural parameters of the technical condition and other measures. The paper pro-*

*vides an overview of key quantitative reliability indicators, such as the reliability function and the "unreliability function," and discusses their significance in determining failure probabilities and life-to-failure. Changes in failure intensity according to the Weibull distribution and the exponential distribution law are examined in detail. Reliability indicators for non-repairable systems include the probability of non-failure operation, failure intensity, and mean time to failure, while maintainability indicators for repairable systems are the probability of recovery and mean recovery time. The comprehensive indicator of the reliability of repairable systems is determined through the coefficient of operational readiness. The conclusions of the paper highlight the importance of using statistical data and reliability indicators to assess systems and components, in particular the oil and gas pipeline systems in Europe, which have significant importance for industrial safety and the reliability of technical facilities.*

**Key words:** *reliability, technical systems, pipeline transportation, failure, forecasting, risk.*