

УДК 621.311.22

О.Ю. Шепель

Національний авіаційний університет

E-mail: shepelua@rambler.ru**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДОВГОВІЧНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ З УРАХУВАННЯМ ДІАГНОСТИКИ ЇХ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТА УМОВ БЕЗПЕКИ****Анотація**

Шепель О.Ю. Математична модель довговічності конструкцій магістральних трубопроводів та діагностика їх технічного стану. Приводиться математична модель довговічності конструкцій магістральних трубопроводів з урахуванням діагностики їх технічного стану та умов безпеки. На сьогодні, завданнями діагностування конструкцій магістральних трубопроводів є локалізація та виявлення вже наявних дефектів типу порушення суцільності матеріалу магістральних трубопроводів, контроль за утворенням та розвитком тріщин, контроль напружено-деформованого стану матеріалу, вимірювання зміни фізико-механічних характеристик металу в процесі експлуатації, що дозволить через вимірювання цих параметрів оцінити залишковий ресурс об'єктів довготривалої експлуатації та розробити принципово нові методи, способи і технології оцінки фактичного фізичного стану металоконструкцій.

Ключові слова математична модель, діагностика, технічний стан, магістральні трубопроводи.

Вступ.

Різноманітні обстеження магістральних трубопроводів (МТ) показали, що термін їх безпечної експлуатації у значній мірі залежить від корозійної стійкості металу та надійності зварних з'єднань. Розрахункова оцінка надійності і міцності конструкцій, що тривало працюють під дією значних навантажень, здійснюється в багатьох випадках без врахування впливу фактору часу на зміну механічних властивостей металу зварних з'єднань. Особливо це стосується багатошарових монтажних швів, які після зварювання часто не піддаються додатковій технологічній обробці з метою зменшення залишкових напружень.

Для забезпечення працездатності конструкції важливим є виявлення не тільки дефектів, але й місць концентрації напружень. Щоб надійно оцінити експлуатаційний термін трубопроводів, необхідний комплексний підхід, важливою складовою якого є визначення напруженого стану труби, зокрема, в місцях із дефектами та в зварних з'єднаннях, з якими пов'язано 70–80% усіх відмов на магістральних трубопроводах. Однією з головних причин зниження ресурсу зварних конструкцій є корозія. Поверхневі дефекти, викликані корозією, як концентратори напружень можуть істотно впливати на надійність та довговічність МТ [1].

Актуальність досліджень. Актуальним є вирішення проблем діагностики конструкцій магістральних трубопроводів в процесі їх експлуатації.

Постановка задачі. Побудова математичної моделі для діагностики конструкцій магістральних трубопроводів.

Розв'язання задачі. На сучасному етапі розвитку трубопровідного транспорту України ставиться завдання не тільки локалізації та виявлення вже наявних дефектів типу порушення суцільності матеріалу магістральних трубопроводів, але й контроль за утворенням та розвитком тріщин; контроль напружено-деформованого стану матеріалу; вимірювання зміни фізико-механічних характеристик металу в процесі експлуатації, що дозволить через вимі-

рювання цих параметрів оцінити залишковий ресурс об'єктів довготривалої експлуатації та розробити принципово нові методи, способи і технології оцінки фактичного фізичного (технічного) стану металоконструкцій.

Відповідно до завдань технічної діагностики на магістральних трубопроводах вирішують наступні задачі: контроль технічного стану, пошук дефектів і прогнозування стану трубопроводів [2].

Основними завданнями діагностування конструкцій МТ є періодичне визначення їх технічного стану і прогнозування динаміки характерних параметрів конструкцій МТ під дією тривалих і короточасних дій навколишнього середовища:

- комплексний моніторинг технічного стану МТ на стадії експлуатації;
- періодично проводиться оцінка рекомендованого терміну служби конструкцій МТ з урахуванням результатів комплексного моніторингу і вимог промислової безпеки.

Для переважної більшості об'єктів магістральних трубопроводів застосовують принцип визначення фактичного технічного стану за наступними параметрами:

- геометричні характеристики;
- наявність/відсутність дефектів типу порушення суцільності;
- фізико-механічні характеристики.

Своєчасне виявлення та правильне визначення фактичних геометричних розмірів (величин зносу) в обладнанні МТ є однією з вимог забезпечення його безаварійної експлуатації, а прогнозування залишкового ресурсу різних видів обладнання має здійснюватися з дійсної величини зносу та його характеру.

Важливим етапом у вирішенні поставленої задачі є розроблення нових та удосконалення існуючих методів математичного моделювання взаємодії зовнішніх фізичних полів з об'єктами контролю для кількості та достовірності діагностичної інформації. Особливо складним об'єктом для дефектоскопічного контролю є трубні вироби та їх різьбові з'єднання, оскільки у них складна геометрична форма, матеріал часто знаходиться під дією значних напружень, а розміри типових дефектів співрозмірні з розмірами витків різьби [3]. Розглянемо систему S , яка складається з прийнятою в статті нумерацією дефектів $q = 1, 2, \dots, q_c$.

До база даних входить інформація про тріщини та дефекти:

- тріщини та дефекти, подібні тріщинам, в монтажних кільцевих зварних з'єднаннях при можливому зміщенні торців труби ($q = 1$), в заводських поздовжніх зварних з'єднаннях ($q = 2$), в основному металі конструктивних елементів (КЕ) ($q = 3$), розшарування ($q = 4$) і включення ($q = 5$) в основному металі і зварних з'єднаннях, ризику ($q = 6$), вм'ятини ($q = 7$), гофри ($q = 8$) в стінці елементів, корозійні тріщини ($q = 9$), корозійна втрата металу ($q = 10$).

Потрібно виявити дефекти, що виявляються засобами внутрішньотрубної і зовнішньої діагностики з певною вірогідністю, а також гіпотетично задаються за результатами попередньої експлуатації ділянки і за статистикою аварій на аналогічних ділянках МТ. Нехай кожен вид зазначених дефектів q , $q = 1, 2, \dots, q_c$, обумовлює відповідний потік руйнування КЕ ділянки.

Масиви дефектів q , $q = 1, 2, \dots, q_c$, які виявим приладами внутрішньотрубної діагностики, ставлять у відповідність масиви граничних часів $t_{y,q,v}$, де $t_{y,q,v}$ - граничні часи досягнення критичної ситуації v -му узагальненні КЕ з дефектом виду q з порядковим номером y , $y = 1, 2, \dots, y_v$.

Масивам кожного виду дефекту q , $q = 1, 2, \dots, q_c$, що виявляються засобами зовнішнього діагностичного обстеження, ставлять у відповідність масив граничних часів $t_{z,q,v}$, де

$t_{z,q,v}$ - граничні часи досягнення критичної ситуації v -му узагальненні КЕ з дефектом виду q з порядковим номером $z, z = 1, 2, \dots, z_v$.

Масивам кожного виду дефекту $q, q = 1, 2, \dots, q_c$, що виявляються засобами як внутрішньотрубної, так і зовнішньої діагностики одночасно, відповідає масив граничних часів $t_{w,q,v}$, де $t_{w,q,v}$ - граничні часи досягнення критичної ситуації v -му узагальненні КЕ з дефектом виду q з порядковим номером $w, w = 1, 2, \dots, w_v$.

Дефекти, які не можуть бути виявлені при застосуванні засобів діагностичного обстеження, обумовлюють досягнення критичної ситуації v -му узагальненні КЕ с дефектом виду q при значеннях граничних часів $t_{q,v}$.

Порядковим номерам y, z, w відповідають координати розташування дефектів по довжині ділянки L_y, L_z, L_w .

Ймовірність руйнування ділянки МТ $P_f = P_f(t_f)$ протягом прогнозованого терміну безпечної експлуатації ділянки t_f визначається за наступними співвідношеннями, що враховують результати його періодичної технічної діагностики [4]:

$$P_f(t \leq t_f) = \sum_{k=1}^K P_{f,k}(t_f - t_{d,k}) / [1 - P_{f,k}(t_f - t_{d,k})] \prod_{k=1}^K [1 - P_{f,k}(t_f - t_{d,k})], \quad (1)$$

де $P_{f,k}(t_f - t_{d,k}) = \left\{ \sum_{q=1}^{q_k} \frac{Q_{k,q,f}(t_f - t_{d,k})}{1 - Q_{k,q,f}(t_f - t_{d,k})} \right\} \times \prod_{q=1}^{q_k} [1 - Q_{k,q,f}(t_f - t_{d,k})]$.

Тут

$$Q_{k,q,f}(t_f - t_{d,k}) = \left\{ \sum_{y=1}^{y_v} \frac{P_{y,q,v}(t_f - t_{d,k})}{1 - P_{y,q,v}(t_f - t_{d,k})} + \sum_{z=1}^{z_v} \frac{P_{z,q,v}(t_f)[1 - P_{z,q,v}(t_{d,k})]}{1 - P_{z,q,v}(t_f)[1 - P_{z,q,v}(t_{d,k})]} + \sum_{w=1}^{w_v} \frac{P_{w,q,v}(t_f - t_{d,k})}{1 - P_{w,q,v}(t_f - t_{d,k})} \right\} \times$$

$$\times \prod_{y=1}^{y_v} [1 - P_{y,q,v}(t_f - t_{d,k})] \prod_{z=1}^{z_v} [1 - P_{z,q,v}(t_f)[1 - P_{z,q,v}(t_{d,k})]] \times \prod_{w=1}^{w_v} [1 - P_{w,q,v}(t_f - t_{d,k})] +$$

$$+ P_{q,y}(t_f)[1 - P_{q,y}(t_{d,k})] + P_{q,3f}(t_f)[1 - P_{q,3f}(t_{d,k})] + P_{x,v}(t_f)[1 - P_{x,v}(t_{d,k})] q(y, z, w).$$

де

$P_{f,k}$ - ймовірність руйнування ділянки трубопроводу певної довжини протягом залишкового строку його експлуатації $t_f - t_{d,k}$ з урахуванням результатів його діагностичного обстеження в момент часу $t_{d,k}$, $P_{f,k} = P_{f,k}(t_f - t_{d,k})$;

$P_{y,q,v}$ - імовірність руйнування v -го узагальненого КЕ, що має дефекти $q, q = 1, 2, \dots, q_c$, протягом залишкового строку $t_f - t_{d,k}$, дефекти розташовані по довжині трубопроводу на відстані $L_y, y = 1, 2, \dots, y_v$ і виявлені тільки засобами внутрішньотрубної діагностики в момент часу $t_{d,k}$, імовірність залежить від граничного часу $t_{y,q,v}$ досягнення критичної величини дефектом в v -му узагальненому КЕ с порядковим номером $y, P_{y,q,v} = P_{y,q,v}(t_f - t_{d,k})$;

$P_{z,q,v}$ - імовірність руйнування v -го узагальненого КЕ, що має дефекти $q, q = 1, 2, \dots, q_c$, протягом залишкового строку $t_f - t_{d,k}$, дефекти розташовані по довжині трубопроводу на відстані $L_z, z = 1, 2, \dots, z_v, L_z \neq L_y$ і виявлені тільки засобами зовнішнього діагностичного обстеження в момент часу $t_{d,k}$, імовірність залежить від граничного часу $t_{z,q,v}$ досягнення критичної ве-

личини дефектом q , $q = 1, 2, \dots, q_c$ з порядковим номером z в ν -му узагальненому КЕ

$$P_{z,q,\nu} = P_{z,q,\nu}(t_f - t_{d,k});$$

$P_{w,q,\nu}$ - імовірність руйнування ν -го узагальненого КЕ, що має дефекти q , $q = 1, 2, \dots, q_c$, протягом залишкового строку $t_f - t_{d,k}$;

дефекти розташовані по його довжині на відстані L_w , $w = 1, \dots, w_\nu$ і спільно виявлені як засобами внутрішньотрубної, так і зовнішньої діагностики в момент часу $t_{d,k}$, залежить від граничного часу $t_{w,q,\nu}$ досягнення дефектом q , $q = 1, 2, \dots, q_c$ в ν -му узагальненому КЕ з порядковим номером w критичної величини $P_{w,q,\nu} = P_{w,q,\nu}(t_f - t_{d,k})$;

$P_{q,\nu}$ - імовірність руйнування ν -го узагальненого КЕ, що має дефекти q , $q = 1, 2, \dots, q_c$, протягом залишкового строку $t_f - t_{d,k}$, що визначається за результатами непрямих методів зовнішньої діагностики (магнітні градієнтометри, акустико-емісійний і вихрострумний методи, електрометричні методи контролю технічного стану ізоляційного покриття і металу), аналізу проектної, виконавчої та експлуатаційно-технічної документації та статистики руйнування ν -го узагальненого КЕ з дефектом q , $q = 1, 2, \dots, q_c$, $P_{q,\nu} = P_{q,\nu}(t_f - t_{d,k})$;

$P_{q,3f}$ - імовірність руйнування ділянки протягом терміну $t_f - t_{d,k}$, що визначається за результатами попередньої експлуатації ділянки з урахуванням діяльності третіх осіб, $P_{q,3f} = P_{q,3f}(t_f - t_{d,k})$; $P_{x,\nu}$ - імовірність руйнування ν -го узагальненого КЕ, що має дефекти з порядковим номером x , розміри яких не дозволяють їх виявити застосовуваними засобами діагностики (конструктивні елементи з довільно орієнтованими тріщинами довжиною $l_0 \leq 70$ мм та глибиною $h_0 \leq 2,0$ мм), $P_{x,\nu} = P_{x,\nu}(t_f - t_{d,k})$;

$t_{d,k}$ - час виявлення дефектів, що відраховується від початку експлуатації МТ; $q(y, z, w) = 1$ за відсутності результатів внутрішньотрубної та зовнішньої діагностики; $q(y, z, w) = 0,5$ за відсутності результатів або внутрішньотрубної, або зовнішньої діагностики; $q(y, z, w) = 0$ при використанні внутрішньотрубної та зовнішньої діагностик.

Знайдемо компоненти імовірності руйнування ділянки за допомогою внутрішньотрубної та зовнішньої діагностики, з урахуванням результатів попередньої експлуатації ділянки з наступних співвідношень:

$$\begin{aligned} P_{y,q,\nu}(t_f - t_{d,k}) &= \varphi\left(\frac{t_f - t_{d,k}}{t_{y,q,\nu}} \frac{1}{N_\nu}\right); P_{z,q,\nu}(t_f - t_{d,k}) = \varphi\left(\frac{t_f - t_{d,k}}{t_{z,q,\nu}} \frac{1}{N_\nu}\right); \\ P_{w,q,\nu}(t_f - t_{d,k}) &= \varphi\left(\frac{t_f - t_{d,k}}{t_{w,q,\nu}} \frac{1}{N_\nu}\right); P_{x,\nu}(t_f - t_{d,k}) = \varphi\left(\frac{t_f - t_{d,k}}{t_{x,\nu}} \frac{1}{N_\nu}\right); \\ P_{q,\nu}(t_f - t_{d,k}) &= \varphi(\lambda_{q,\nu}(t_f - t_{d,k})L); P_{q,3f}(t_f - t_{d,k}) = \varphi(\lambda_{q,3f}(t_f - t_{d,k})L), \end{aligned} \quad (2)$$

$$x = 1, 2, \dots, x_\nu, \quad y = 1, 2, \dots, y_\nu, \quad z = 1, 2, \dots, z_\nu, \quad w = 1, 2, \dots, w_\nu,$$

де N_ν - загальна кількість складових членів ν -го узагальненого КЕ, $\nu = 1, 2, \dots, \nu_\nu$;

N_1 - кількість монтажних зварних з'єднань на розрахунковій ділянці;

N_2 - кількість заводських зварних з'єднань;

$N_2 N_3$ - число узагальнених КЕ на діагностичній ділянці, основний метал яких містить довільно орієнтовану тріщину з характерними розмірами $l_0 \leq 70$ мм, $h_0 \leq 2,0$ мм;

$N_2 N_4$ - число штампозварних відводів на розрахунковій ділянці;

$N_2 N_5$ - число трійникових з'єднань на розрахунковій ділянці; N_6 - число днів на розрахунковій ділянці;

$N_2 N_7$ - число перехідників на розрахунковій ділянці;

$N_2 \lambda_{q,v}$ - коефіцієнт інтенсивності потоку руйнувань розрахункової ділянки з дефектами виду q , $q = 1, 2, \dots, q_c$, які встановлені по результатам непрямих методів зовнішньої діагностики, а також за статистикою руйнування аналогічних об'єктів;

$N_2 \lambda_{q,3f}$ - коефіцієнт інтенсивності руйнувань розрахункової ділянки з дефектами виду q , $q = 1, 2, \dots, q_c$, що визначається по результатам попередньої експлуатації ділянки з урахуванням діяльності третіх осіб;

$N_2 \varphi = \varphi(t)$ - функція розподілу руйнувань узагальнених КЕ діагностичної ділянки; $t_{y,q,v}$, $t_{z,q,v}$, $t_{w,q,v}$, $t_{q,v}$ - граничні часи досягнення критичної ситуації v -му узагальненому КЕ з дефектами виду q , $q = 1, 2, \dots, q_c$ порядкових номерів y, z, w .

Руйнування ділянки протягом залишкового строку його служби як функції розподілу руйнувань можливо представити через розподіл Пуасона:

$$\begin{aligned} \varphi &= k_v \frac{t_f - t_{d,k}}{t_{i,g,v}} \frac{1}{N_v} \exp\left(-k_v \frac{t_f - t_{d,k}}{t_{i,g,v}} \frac{1}{N_v}\right), i = y, z; \\ \varphi &= k_v \frac{t_f - t_{d,k}}{t_{i,g,v}} \frac{1}{N_v} \exp\left(-k_v \frac{t_f - t_{d,k}}{t_{x,v}} \frac{1}{N_v}\right); \\ \varphi &= k_v \lambda_i (t_f - t_{d,k}) L \exp(-k_v \lambda_i (t_f - t_{d,k}) L), i = q, 3f, \end{aligned} \quad (3)$$

де k_v - коефіцієнт безпеки, що забезпечує відповідність значень дійсних і розрахункових часів руйнування v -го узагальненого КЕ, $v = 1, 2, \dots, v_v$.

Граничні часи $t_{y,q,v}$, $t_{z,q,v}$, $t_{w,q,v}$, $t_{q,v}$ експлуатації v -го узагальненого КЕ ділянки, $v = 1, 2, \dots, v_v$, обчислюють за методиками оцінки довговічності КЕ з геометричними дефектами технологічного та експлуатаційного походження розрахункової ділянки, що перебуває під дією експлуатаційного навантаження та зовнішніх впливів [4,5].

Висновки.

В статті запропоновано математичну модель прогнозування довговічності конструкцій магістральних трубопроводів з урахуванням діагностики їх технічного стану та умов безпеки.

З аналізу отриманих формул можна зробити висновок, що підвищення якості проектування, виготовлення й експлуатації МТ є основним напрямком управління їх надійністю.

Ефективність, надійність та безпека функціонування магістральних трубопроводів України значною мірою пов'язана з удосконаленням систем управління режимами роботи технологічних об'єктів трубопровідної системи в цілому. Як об'єкт управління система відноситься до класу багатовимірних нелінійних стохастичних систем із розподіленими параметрами, для яких характерні мережна багаторівнева структура, наявність безперервних та дискретних керуючих впливів, значний рівень невизначеності, параметрів, стану, а також впливів навколишнього середовища.

Література

1. Самсонов Р.О. Инновации для защиты от коррозии // Газовая промышленность. – 2010. – №3. – С. 75-77.
2. Заміховський Л. М., Калявін В. П. Основи теорії надійності та технічної діагностики систем. Навч. посібник. Івано-Франківськ, Вид-во "Полум'я". – 2004. – 230 с.
3. Алимов С.В., Антипов Б.Н., Захаров А.В., Кузнецов А.Н. Оценка технического состояния и определение сроков безопасной эксплуатации трубопроводов // Газовая промышленность. – 2009. – №1. – С. 60-61.
4. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Прогнозирование долговечности конструкций магистральных газопроводов с учетом диагностики их технического состояния и условий безопасности // Газовая промышленность. – 2008. – №9. – С. 84-87.
5. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Методика оценки остаточного срока службы и периодичности проведения диагностики технического состояния трубопроводов. Ч. 1. Определение вероятности разрушения и сроков безопасной эксплуатации и очередного обследования участка трубопровода // Контроль. Диагностика. – 2006. – №5(95). – С. 15-23.

Аннотація

Шепель А.Ю. *Математическая модель долговечности конструкций магистральных трубопроводов и диагностика их технического состояния.* Приводится математическая модель долговечности конструкций магистральных трубопроводов с учетом диагностики их технического состояния и условий безопасности. На сегодня, задачами диагностирования конструкций магистральных трубопроводов является локализация и выявление уже имеющихся дефектов типа нарушения сплошности материала магистральных трубопроводов, контроль за образованием и развитием трещин, контроль напряженно-деформированного состояния материала, измерение изменения физико-механических характеристик металла в процессе эксплуатации, что позволит через измерения этих параметров оценить остаточный ресурс объектов долговременной эксплуатации и разработать принципиально новые методы, способы и технологии оценки фактического физического состояния металлоконструкций.

Ключевые слова: математическая модель, диагностика, техническое состояние, магистральные трубопроводы.

Abstract

Shepel O.U. *Mathematical model for main pipelines durability and diagnostics of their technical condition.* Mathematical model of durability of structures subject to pipelines diagnosis of their technical and security conditions is conducted. Today effective and reliable operation of pipelines Ukraine aims to diagnose and control the formation and development of cracks, control stress and strain of the material, measuring changes in physical and mechanical characteristics of metal in the operation to evaluate the residual activity of objects and to develop long-term operation fundamentally new methods, means and technology assessment of their technical hardware.

Key words: mathematical model, diagnostics, technical condition, pipelines

Здано в редакцію:
14.04.2010 р.

Рекомендовано до друку:
д.т.н, проф. Конін В.