

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОНТРОЛЬНО-ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ЗАХОДІВ НА ЛІНІЙНІЙ ЧАСТИНІ МАГІСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДУ

В. Я. Грудз¹, В. М. Сусак²

¹*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ*

²*НАК "Нафтогаз України", Київ*

Надійшла до редакції 12.08.05

Резюме: Розглядаються питання централізованого обслуговування лінійної частини магістрального газопроводу. Створено економіко-математичну модель процесу, яка розглядається як функція питомих витрат на обслуговування. Оптимізація процесу обслуговування дає можливість скоротити витрати на обслуговування.

Ключові слова: магістральний газопровід, економіко-математична модель, обслуговування газопроводу.

В. Я. Грудз, В. М. Сусак. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНТРОЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА.

Резюме: Рассматривается вопрос централизованного обслуживания линейной части магистрального газопровода. Создана экономико-математическая модель процесса, которая рассматривается как функция удельных затрат на обслуживание. Оптимизация процесса обслуживания дает возможность сократить затраты на эксплуатацию.

Ключевые слова: магистральный газопровод, экономико-математическая модель, обслуживание газопровода.

V. Ya. Grudz, V. M. Susak. MATHEMATICAL MODEL OF CONTROL-RESTORATION MEASURES ON LINEAR PART OF MAIN GAS PIPELINE.

Abstract: The centralized maintenance of linear part of main gas pipeline is considered. The economical and mathematical model of process, which is functionally depended on a specific expenses on service, is created. Optimization of service process allows to shorten expenses on exploitation.

Keywords: main gas pipeline, economical-mathematical model, service gas pipeline.

За станом на сьогодні все більшої актуальності для експлуатації трансукраїнської системи магістральних газопроводів набуває проблема забезпечення безперервного постачання газу, зниження його втрат, запобігання аварій і уникнення забруднення навколишнього середовища. Старіння газопроводів, велика кількість аварій і пошкоджень на лінійній частині серйозно ускладнюють процес технічної експлуатації об'єктів газотранспортної системи і ведуть до збільшення матеріальних витрат.

Однією з найважливіших вимог, які ставляться до системи забезпечення споживачів газом, є надійність. Відомо, що показники надійності прямо залежать від терміну служби об'єкта. Для магістральних газопроводів встановлено і нормативно обґрунтовано граничний термін експлуатації – 33 роки, після закінчення якого необхідна реконструкція або капітальний ремонт системи для відновлення показників надійності.

17,27 % газотранспортних магістралей України експлуатуються вже понад 33 роки, а ще для 13,66 % магістралей до вказаного строку залишилось менше 10 років. Отже, 30,33 % газопроводів від загальної їх протяжності вимагають невідкладних заходів не тільки для підвищення експлуатаційної надійності, але й для забезпечення функціонування.

Слід відзначити, що експлуатаційними службами постійно ведуться роботи з діагностування стану газопроводів. Експлуатаційники застосовують різноманітні методи діагностики, в тому числі інтелектуальні поршні. Останні показали, що на окремих ділянках стан лінійної частини газопроводів критичний. Корозійні процеси призвели до зменшення робочої товщини стінок труб до такої міри, що подальша експлуатація газопроводів під робочим тиском вже стає небезпечною для життя людей.

Одним із найважливіших питань удосконалення системи технічного обслуговування

і ремонту лінійної частини магістральних газопроводів за таких умов є вибір раціональної стратегії обслуговування з метою подальшого оптимального планування контрольно-відновлювальних заходів.

При формуванні стратегії обслуговування і ремонту системи необхідно враховувати специфіку реального процесу експлуатації лінійної частини, а також вимоги діючих нормативних документів, що накладають серйозні обмеження на можливі варіанти розрахункових схем технічного обслуговування і ремонту.

За основу розрахункової схеми контрольно-відновлювальних заходів приймається двостадійна модель руйнування газопроводу. Стратегія формується з урахуванням виду контролю, стану об'єктів, характеру ремонтно-експлуатаційних заходів і принципів впливу на систему за результатами контролю.

Припустимо, що лінійна частина магістрального газопроводу (об'єкту) контрольно-

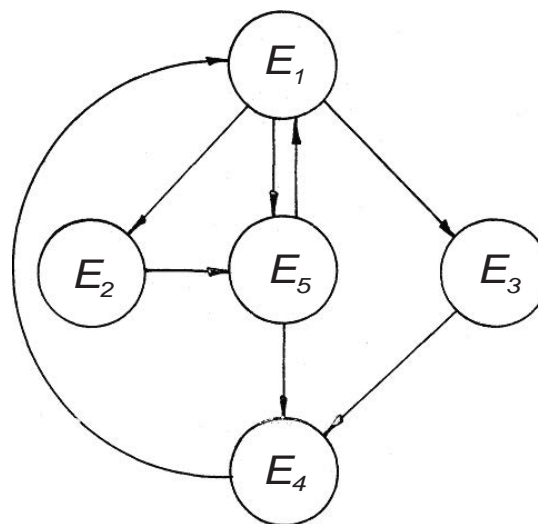


Рис. 1. Графік переходу між станами лінійної частини магістральних газопроводів у ході контрольно-відновлювальних заходів: E_1 – справний стан; E_2 – несправний працездатний; E_3 – непрацездатний (відмова); E_4 – відновлення; E_5 – контроль

відновлювального обслуговування знаходиться в деякій кінцевій кількості станів $E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$. Випадковий процес еволюції станів системи в часі описується функціями $X(t)$ зі ступінчастими траєкторіями. Аналіз практики експлуатації лінійної частини системи газопроводів та вимог діючих галузевих нормативних документів дає можливість виділити такі можливі стани системи (графік переходу між станами системи у ході контрольно-відновлювальних заходів наведено на рис. 1):

$$X(t) = \begin{cases} E_1 - \text{справний стан,} \\ E_2 - \text{не справний стан, але можлива робота,} \\ E_3 - \text{непрацездатний (відмова),} \\ E_4 - \text{ремонтно-відновлювальне обслуговування,} \\ E_5 - \text{контроль.} \end{cases}$$

Розрахункова схема контрольно-відновлювальних заходів (стратегії) формулюється в такий спосіб:

- на магістральному газопроводі строго здійснюються періодичні перевірки стану (герметичності) лінійної частини (з періодом δ);
- у випадку виявлення несправностей і пошкоджень (свищі, витіки і пріривняні до них стани) здійснюються невідкладні відновлювальні роботи;
- у випадку відмови системи (самостійного прояву пошкодження) у міжоглядовий період проводяться невідкладні аварійно-відновлювальні роботи.

Будемо вважати, що відмова на лінійній частині виявляється практично миттєво й абсолютно достовірно. Достовірний контроль передбачає повне виявлення пошкодження P в результаті перевірки. Припустимо, що заходи щодо технічного обслуговування і ремонту здійснюються практично миттєво (через незрівнянно менші витрати часу порівняно з δ) і не позначаються на рівні показників надійності газопроводу.

Мета раціонального планування заходів щодо обслуговування і ремонту лінійної частини магістрального газопроводу полягає в мінімізації сумарних питомих витрат та усіх їх складових при обраній стратегії контрольно-відновлювальних заходів:

$$\Phi(\bar{z}_{\Sigma}^{\text{KBЗ}}) \Rightarrow \min. \quad (1)$$

Така постановка задачі цілком традиційна і виправдана. Для реалізації цієї задачі необхідно одержати інтегральний вираз функції мети (задача аналізу) і показників, її складових та знайти оптимальні (екстремальні) значення функції при різних вихідних даних і за граничних умов (задача синтезу). Головними принципами формалізації запропонованої математичної моделі є імовірнісний підхід і облік фактора надійності лінійної частини магістрального газопроводу.

Пропонована розрахункова схема контрольно-відновлювальних заходів оцінюється таким інтегральним показником:

$$\bar{z}_{\Sigma}^{\text{KBЗ}} = z_{\text{ав}} \cdot \bar{n}_{\text{ав}} + z_{\text{т}} \cdot \bar{n}_{\text{т}} + z_{\text{пр}} \cdot \delta^{-1} + \bar{Q} \quad (2)$$

де $\bar{n}_{\text{ав}}, \bar{n}_{\text{т}}$ – узагальнені показники, що оцінюють відповідно середню питому інтенсивність усунення аварій і пошкоджень на ділянці, що обслуговується, за 1 добу; \bar{Q} – узагальнений показник з оцінки питомого збитку від втрат газу в одиницях грн/добу; $z_{\text{ав}}, z_{\text{т}}$ – показники ремонтпридатності лінійної частини, що оцінюють відповідно середні витрати на одну аварію чи пошкодження.

З урахуванням обумовлених вище розрахункових схем руйнування та обслуговування лінійної частини вважаємо інтенсивність потоку відмов і пошкоджень λ постійною величиною. Отже, у випадку однопараметричного експонентного розподілу для характеристики вимоги безвідмовності системи можна обмежитися єдиним показником λ (1/добу).

Процес розвитку пошкодження до його самостійного прояву (відмова системи) описується випадковим часом існування несправності з функцією розподілу $\Phi(t)$.

Крім показників ремонтпридатності (крім $Z_{ав}$, $Z_{п}$) і ефективності обслуговування газотранспортної системи необхідно враховувати:

- витрати на контрольні заходи (періодичне патрулювання) – $Z_{пр}$;
- збитки від витоку газу при стравлюванні його під час ремонту ділянки – C ;
- середню питому величину збитків від одного пошкодження (свища, витоку) – q ;
- імовірність виявлення пошкоджень за результатами перевірки – P ;
- періодичність контролю – δ (доба).

Розглянемо стаціонарний режим обслуговування необмеженої тривалості з періодичним контролем стану лінійної частини з частотою $1/\delta$ і роздільною здатністю P .

Питома кількість пошкоджень, виявлених за результатами перевірок, які не проявилися самостійно, складає:

$$\begin{aligned} \bar{\Pi}_n &= \frac{1}{\delta} \left[\lambda \int_0^{\delta} P \bar{\Phi}(t) dt + \right. \\ &+ \lambda \int_{\delta}^{2\delta} P(1-P) \Phi(t) dt + \\ &+ \lambda \int_{2\delta}^{3\delta} P(1-P)^2 \Phi(t) dt + \dots \left. \right] = \\ &= \frac{1}{\delta} \lambda P \sum_{K=0}^{\infty} (1-P)^K \int_{K\delta}^{(K+1)\delta} \bar{\Phi}(t) dt, \end{aligned} \quad (3)$$

де $\bar{\Phi}(t) = 1 - \Phi(t)$ – імовірність непереходу пошкоджень, що з'явилися, у відмовах за час t (функція надійності).

Відмова системи є результатом самостійного прояву пошкоджень (несправностей), що сталися у період між двома контрольними перевірками чи не виявлених під час попередніх контрольних оглядів.

Питому кількість відмов (аварій) визначимо так:

$$\begin{aligned} \bar{\Pi}_{ав} &= \frac{1}{\delta} \left[\lambda \int_0^{\delta} \Phi(t) dt + \right. \\ &+ \lambda \int_{\delta}^{2\delta} (1-P) [\bar{\Phi}(t-\delta) - \bar{\Phi}(t)] dt + \\ &+ \lambda \int_{2\delta}^{3\delta} (1-P)^2 [\bar{\Phi}(t-\delta) - \bar{\Phi}(t)] dt + \dots \left. \right] = \\ &= \frac{1}{\delta} \lambda \int_0^{\delta} \Phi(t) dt + \\ &+ \frac{1}{\delta} \lambda \sum_{K=1}^{\infty} (1-P)^K \int_{K\delta}^{(K+1)\delta} [\bar{\Phi}(t-\delta) - \bar{\Phi}(t)] dt. \end{aligned} \quad (4)$$

Оцінку узагальненого показника збитків від витоків газу в атмосферу доцільно провести в два етапи:

$$\bar{Q} = \bar{Q}_{зб} + \bar{Q}_{стр}, \quad (5)$$

де $\bar{Q}_{зб}$, $\bar{Q}_{стр}$ – відповідно питомі показники збитків від витоків газу при несправностях (витоки, свищі) та від стравлювання газу з ділянки магістралі при проведенні відновлювальних робіт.

Оцінити питомі показники збитків від витоків газу, починаючи від виявлення пошкодження (витоку) і до його ліквідації, досить складно. Апаратури, здатної фіксувати обсяги витоків через мікросвищі і роз'ємні з'єднання, на даний час немає. Система безупинного контролю за герметичністю трубопроводів поки що знаходиться в стадії дослідно-теоретичних розробок [1]. Статистичні методи неприйнятні через відсутність потрібної інформації. Необхідно відмітити, що величина питомих втрат газу через свищі і витоки має дуже широкий діапазон. Із сформульованим ступенем точності середні питомі втрати q можна визначати за непрямыми даними залежно від параметрів (режиму) перекачування, характеру і розмірів пошкодження. Тоді питомі збитки від витоків газу через пошкодження (середню щодобову втрату) q визначимо так:

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{зб} &= \frac{1}{\delta} \left[\lambda \int_0^{\delta} dt q \int_0^{\delta-t} \Phi(x) dx + \right. \\ &+ \lambda \int_{\delta}^{2\delta} dt q \int_{t-\delta}^t (1-P) \bar{\Phi}(x) dx + \\ &+ \lambda \int_{2\delta}^{3\delta} dt q \int_{t-\delta}^t (1-P) \bar{\Phi}(x) dx + \dots \left. \right] = \quad (6) \\ &= \frac{1}{\delta} \left[\lambda \int_0^{\delta} dt q \int_0^{\delta-t} \bar{\Phi}(x) dx + \right. \\ &+ \lambda q \sum_{K=1}^{\infty} (1-P)^K \int_{K\delta}^{(K+1)\delta} dt \int_{t-\delta}^t \bar{\Phi}(x) dx \left. \right]. \end{aligned}$$

Звичайно, найбільші втрати газу відбуваються при стравлюванні газу з ділянки газопроводу, що ремонтується. Об'єм випущеного газу обумовлюється характеристиками ділянки (довжина перекритої ділянки між двома лінійними кранами, діаметр газопроводу) і параметрами газу, що перекачується (тиск, температура, коефіцієнт стисливості). Не важко визначити середні значення витрат (збитку) газу C від витрат під час стравлювання перед проведенням вогневих робіт на трасі.

З урахуванням цього питомий показник збитків від стравлювання газу з ділянок газотранспортної системи, що обслуговується, складає:

$$\bar{Q}_{стр} = \frac{c}{\delta} (1 - P_{нев}) \quad , \quad (7)$$

де $P_{нев}$ – повна імовірність невиявлення пошкоджень за результатами всіх перевірок у ході експлуатації лінійної частини.

Розрахунок повної імовірності матиме такий вигляд:

$$\begin{aligned} P_{нев} &= \prod_{k=0}^{\infty} \prod_{t=0}^{\delta} \sum_{r=0}^{\infty} \frac{(\lambda dt)^r}{r!} e^{-\lambda dt} \times \\ &\times \left[1 - \bar{\Phi}((K+1)\delta - t) (1-P)^K P \right]^r = \\ &= \prod_{k=0}^{\infty} \prod_{t=0}^{\delta} \exp \left\{ -\lambda P (1-P)^K \bar{\Phi}((K+1)\delta - t) dt \right\} = \quad (8) \\ &= \prod_{K=0}^{\infty} \exp \left\{ -\lambda P (1-P)^K \int_0^{\delta} \bar{\Phi}((K+1)\delta - t) dt \right\} = \\ &= \exp \left\{ -\lambda P \sum_{K=0}^{\infty} (1-P)^K \int_{K\delta}^{(K+1)\delta} \bar{\Phi}(x) dx \right\}. \end{aligned}$$

Враховавши (6) – (8), перетворимо вираз (5) до вигляду

$$\begin{aligned} \bar{Q} &= \frac{1}{\delta} \left[\lambda \int_0^{\delta} dt q \int_0^{\delta-t} \bar{\Phi}(x) dx + \right. \\ &+ \lambda q \sum_{K=1}^{\infty} (1-P)^K \int_{K\delta}^{(K+1)\delta} dt \int_{t-\delta}^t \bar{\Phi}(x) dx + \quad (9) \\ &+ C \left(1 - \exp \left[-\lambda P \sum_{K=0}^{\infty} (1-P)^K \int_{K\delta}^{(K+1)\delta} \bar{\Phi}(x) dx \right] \right) \left. \right]. \end{aligned}$$

Приймаючи обумовлене вище припущення про експоненціальний характер функції розподілу випадкового часу існування пошкодження до самостійного прояву (відмови), середній час існування пошкодження τ_{cp} визначимо як математичне очікування випадкового наробітку на відмову:

$$\begin{aligned} \tau_{cp} &= M_{\xi} = \int_0^{\infty} t d\Phi(t) = \int_0^{\infty} \bar{\Phi}(t) dt = \quad (10) \\ &= \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\alpha}. \end{aligned}$$

Зручніше записати:

$$\Phi(t) = 1 - \exp(-\alpha t) \quad , \quad (11)$$

де $\alpha = 1/\tau_{cp}$.

Опускаючи численні проміжні перетворення та враховуючи (10) і (11), одержимо вирази узагальнених показників (3), (4), (9) в остаточному вигляді:

$$\bar{P}_n = \frac{\lambda P}{\alpha \delta} \cdot \frac{(1 - e^{-\alpha \delta})}{1 - (1-P)e^{-\lambda \delta}}; \quad (12)$$

$$\bar{P}_{ар} \lambda - \bar{P}_n; \quad (13)$$

$$\bar{Q} = \left(C + \frac{q}{\alpha} \right) (\alpha - \bar{P}_n) + \frac{C}{\delta} [1 - \exp(-\bar{P}_n \delta)]. \quad (14)$$

Таким чином, функція мети середніх питомих сумарних витрат $\bar{Q}_{\Sigma}^{КВЗ}$ на здійснення контрольно-відновлювальних заходів у рамках обраної стратегії має вигляд:

$$\bar{z}_{\Sigma}^{\text{КВЗ}} = \frac{z_{\text{np}} + C}{\delta} + \lambda \left(z_{\text{ав}} + \frac{q}{\alpha} \right) - \left(z_{\text{ав}} - z_{\text{n}} + \frac{q}{\alpha} \right) \bar{\pi}_{\text{n}} - \frac{C}{\delta} \exp(-\bar{\pi}_{\text{n}} \delta), \quad (15)$$

де $\bar{\pi}_{\text{n}}$ описується виразом (12).

Розроблена математична модель оцінки ефективності контрольно-відновлювальних заходів у рамках прийнятої стратегії технічного обслуговування і ремонту досить адек-

ватно описує реальний процес обслуговування лінійної частини магістрального газопроводу і дозволяє вирішувати комплекс задач щодо його вдосконалення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Грудз В. Я., Тымків Д. Ф., Яковлев Е. И. Обслуживание газотранспортных систем. – К.: Изд. УМК ВО, 1991. – 160 с.