

# *Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища*

---

---

УДК 622.692.4

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ

**В. Я. Грудз, Я. В. Грудз, В. М. Боднар, Т. Ф. Тутко**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;  
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;  
e-mail: snp@nung.edu.ua*

*Розглядаються питання підвищення надійності експлуатації газотранспортних систем у складних умовах шляхом реформування і оптимізації системи технічного обслуговування, наведено принципи і основні математичні моделі оптимізації розміщення баз запасних елементів по трасі трубопроводу з урахуванням умов їх доставки до місць ліквідації аварійних ситуацій.*

**Ключові слова:** *магістральний газопровід, технічне обслуговування, оптимізація, математична модель.*

Одним з визначальних способів забезпечення надійності трубопроводів є технічне обслуговування магістралі, спрямоване на ефективно попередження аварійних ситуацій і усунення наслідків аварій лінійної частини. Тут доводиться стикатися з суперечливою проблемою: якщо зосередити зусилля на профілактичному обслуговуванні, то це підвищить надійність магістралі, але вимагатиме великих матеріальних витрат; в той же час, якщо все обслуговування звести до ліквідації аварійних ситуацій, виключивши заходи попереджувального характеру, показники надійності системи виявляться вельми низькими. Очевидно, існує оптимальний розподіл ресурсів, призначених для виконання різних видів експлуатаційного обслуговування.

Однак пошук такого оптимального рішення ускладнений через цілий ряд невизначеностей, пов'язаних з прогнозуванням змін експлуатаційних умов, появою несправностей, аварій і т. д. Все це ускладнює вибір раціональної системи технічного обслуговування лінійної частини. Розробка оптимальної системи технічного обслуговування полягає в побудові комплексу взаємопов'язаних заходів щодо чисельності персо-

налу, кількості аварійно-відновлювальних бригад, раціональному їх розміщенню, регламенту профілактичних робіт, технічному оснащенню, технології і транспортному забезпеченню ремонтних робіт, а також резерву запасних частин і матеріалів на аварійно-відновлювальні ремонти.

На даний час через слабо розвинену мережу доріг вздовж трубопроводів у гірських умовах та їх недостатню прохідність у вітчизняній практиці експлуатації трубопроводів поширена розосереджена система обслуговування. Така система вимагає додаткових витрат на утримання зайвого персоналу і великого числа аварійно-відновлювальних пунктів.

Розвиток мережі магістральних трубопроводів в гірських і важкопрохідних районах вимагає удосконалення системи технічного обслуговування газопроводів на рівні сучасних досягнень науки і техніки. Цій меті відповідає обслуговування трубопроводу з одного або декількох вузлових пунктів траси за допомогою авіації.

Така система відрізняється кращою організаційною структурою і за досить високої мобільності вимагає менше ремонтного персоналу, але суттєво залежить від стану погодних умов, оскільки необхідність в обслуговуванні трубопроводу в нельотну погоду викликає затримку вильоту бригади до місця виконання робіт. Це знижує ефективність використання повітряного транспорту для обслуговування ремонтних робіт у зв'язку з несвоєчасною ліквідацією аварій та наслідків від цього.

Стаціонарна ймовірність події, що полягає в затримці вильоту відновлювальної бригади до місця робіт через нельотну ситуацію, визначається співвідношенням

$$\rho = \lambda_n \tau, \quad (1)$$

де  $\lambda_n$  – параметр потоку, що характеризує розподіл льотних ситуацій;  $\tau$  – середній час тривалості нельотної ситуації.

Згідно з даними табл. 1, для конкретної системи трубопроводів значення  $\lambda_n$  і  $\tau$  можуть бути отримані з виразів:

$$\lambda_n = \frac{\sum_{i=1}^{12} \frac{N}{\tau_i}}{8760}, \quad \tau = \frac{\sum_{i=1}^{12} \tau_i}{12}, \quad (2)$$

де 8760 – загальний річний фонд часу (годин);  $N$  – середньомісячна повторюваність умов погоди (число випадків);  $\tau_i$  – повторюваність періодів середньої неперервної тривалості умов погоди  $K_{100 \times 1}$  (годин);  $\frac{N}{\tau_i}$  – інтенсивність виникнень умов  $K_{100 \times 1}$ ;  $K_{100 \times 1}$  – мінімум метеоумови, коли висота хмар  $> 100$  м, а горизонтальна видимість  $> 1000$  м.

Подальші розрахунки зводяться до порівняння збитків від простою перекачування нафти трубопроводом у разі використання повітряного або наземного виду транспорту для доставки до місця аварії бри-



Після нескладних алгебраїчних перетворень з урахуванням того, що  $dt$  прямує до нуля, отримуємо

$$\begin{aligned}
 & -(\lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_i) p_0 + p_1 \mu_1 + \dots + p_\zeta \mu_j = 0 \\
 & -(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_i + \mu_0) p_0 + p_0 \mu_0 + \dots + p_\eta \mu_j = 0 \\
 & \dots\dots\dots \\
 & -(\mu_0 + \mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_j) p_k + p_{r-1} \lambda_1 + \dots + p_{k-1} \lambda_i = 0
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

З коефіцієнтів при шуканих ймовірностях переходів складається стохастична матриця, що має наступні властивості:

$$0 \leq p \leq 1, \quad \sum_0^m p_k = 1.$$

В загальному випадку така матриця має вигляд:

$$\begin{array}{ccc}
 P_{c_m^k} & P_{c_m^k} & P_{c_m^k} \\
 C_m^k - [\sum_{i=1}^m (1-\delta)\lambda_i + \sum_{i=1}^m (1-\delta)\lambda_i] & \delta\mu_j & \delta\mu_j \\
 C_m^k & -[\sum_{i=1}^m (1-\delta)\lambda_i + \sum_{i=1}^m (1-\delta)\mu_i] & \delta\mu_j \\
 C_m^k & \delta\lambda_j & -[\sum_{i=1}^m (1-\delta)\lambda_i + \sum_{i=1}^m (1-\delta)\mu_i]
 \end{array}
 \tag{7}$$

При цьому

$$\delta = \begin{cases} 1 \text{ при } i = j, \\ 0 \text{ при } i \neq j. \end{cases}$$

Матриця (7) побудована з  $m+1$  груп рядків і такого ж числа стовпців. Кількість рядків в кожній групі визначається числом сполучень  $C_m^k$ , де  $k$  – порядковий номер групи, при цьому виконується умова

$$0 \leq k \leq m.$$

У формулах, що визначають діагональні елементи матриці, число доданків  $\lambda_i$  першої суми рівне  $m - k$ , а число доданків  $\mu_i$  другої суми рівне  $k$ . Індеси  $i$  та  $j$  при  $\lambda$  і  $\mu$  приймають будь-які дійсні значення від 1 до  $m$  і належать підмножині цілих додатних чисел  $A_1$  і  $A_2$ , які складають єдину множину  $A$ , причому,  $A_2$  доповнює  $A_1$  до множини  $A$ , що може бути записано наступним чином

$$\begin{array}{ccc}
 i \in A_1CA & & i = (1, m) \\
 & A_1 = A | A_2 & \\
 j \in A_2CA & & j = (1, m)
 \end{array}
 \tag{8}$$

Отримана матриця має місце у тому випадку, коли число ремонтних бригад, що беруть участь в процесі відновлення, дорівнює числу вимог на обслуговування.

У практиці експлуатації найбільш цікавий варіант обслуговування з обмеженим числом ремонтних бригад, тобто якщо  $m > n$ , де  $n$  – число бригад.

Матриця переходу в цьому випадку будується аналогічно матриці при  $m = n$ , лише з тією різницею, що загальне кількість членів в формулах, що визначають діагональні елементи, і в кожному стовпці матриці не повинно перевищувати  $n$ .

На підставі розв'язку системи рівнянь (6) оптимізується число бригад на централізованому пункті з умов отримання мінімуму витрат через простій трубопроводу, через нестачу бригад і витрат на утримання зайвого ремонтного персоналу. Попередні розрахунки, виконані за даною методикою, показали, що обслуговування 4-х трубопроводів може виконуватися силами однієї аварійно-відновлювальної бригади.

Тоді для загальної оцінки ефективності організації централізованої системи обслуговування виконується порівняння можливих річних збитків від простою трубопроводів, витрат на оренду того чи іншого виду транспорту, а також витрат на утримання ремонтних бригад за формулами:

$$Q_1 = q_1 + r_1 c_1 + n_1 c_2, \quad (9)$$

$$Q_2 = q_2 + r_2 c_2 + n_2 c_3,$$

де  $Q_1, Q_2$  – загальні річні витрати відповідно при централізованому і децентралізованому обслуговуванні;  $r_1, r_2$  – необхідна кількість відповідно повітряних і наземних транспортних засобів;  $c_1, c_2$  – вартість річної оренди однієї одиниці відповідно повітряного і наземного транспорту;  $n_1, n_2$  – кількість ремонтних бригад відповідно при централізованому і децентралізованому обслуговуванні;  $c_3$  – річні витрати на утримання однієї ремонтної бригади.

Виконані розрахунки показують, що загальні витрати на децентралізоване обслуговування приблизно в 1,5 рази перевищують витрати на централізоване обслуговування.

З точки зору забезпечення запасними частинами і матеріалами, попит на які виникає в результаті виходу з ладу окремих елементів трубопроводу, проблема для нафтопроводів полягає перш за все у визначенні розміру і розміщення аварійного запасу труб, як найбільш габаритного і дорогого резервного обладнання.

Існує певна аналогія між підтримкою деякого рівня запасів за наявності випадкового попиту на ці запаси і надійністю технічної системи, коли попит створюється виходами з ладу окремих її елементів.

Мінімум очікуваних витрат, пов'язаних з утриманням резерву і збитками від затримки ліквідації пошкодження через несвоєчасне забезпечення трубами, визначається із співвідношень [3]:

$$W_j = \sum_{i=0}^{\infty} W_{ij} p_i, \quad (10)$$

$$W_{ij} = \begin{cases} C_j & \text{при } i = j, \\ C_j + (i - j)U & \text{при } i \neq j. \end{cases} \quad (11)$$

де  $W_j$  – загальні збитки від простою трубопроводу і витрат на зберігання труб;  $W_{ij}$  – збитки для випадку, коли запас становить  $i$  одиниць труб, а потрібно  $j$  одиниць;  $C_j$  – вартість одиниці труб аварійного запасу;  $U$  – збитки від простою трубопроводу через затримку, пов'язану з доставкою труб.

Розрахунки, виконані за цією методикою, показали, що аварійний запас труб не повинен перевищувати 0,1% від протяжності трубопроводу і при централізованій системі обслуговування може бути розміщений на централізованому аварійно-відновлювальному пункті.

Забезпечення надійної роботи обладнання магістрального трубопроводу вимагає певного рівня резерву запасних частин. Відсутність резерву або його недостатній обсяг може призвести при відмовах основного обладнання до значних збитків у зв'язку з вимушеним простоєм трубопроводу. У той же час надмірно завищений резерв запасних частин веде до замороження коштів, морального зносу невикористаного обладнання і супроводжується складськими витратами.

У зв'язку з цим виникає задача про знаходження оптимального рівня резерву запасних частин, при вирішенні якої необхідно враховувати випадковість у потребах запасних частин. При цьому слід враховувати, що забезпечення кожної перекачувальної станції запасними частинами тільки з власного резерву може бути пов'язане зі значними економічними затратами. Так, електродвигунів основних насосних агрегатів, силових трансформаторів, арматури великих проходів нараховується на насосній станції зазвичай одиниці і математичне сподівання потреби в запасних частинах для названих видів обладнання може бути дуже малим. У той же час вихід з ладу будь-якого із зазначених типів обладнання за відсутності запасних частин до нього може серйозно порушити роботу трубопроводу, оскільки ці види обладнання можуть мати специфічні особливості і випускатися промисловістю в обмежених кількостях.

Тому доцільним є створення об'єднаного резерву, що обслуговує всі об'єкти трубопроводу. Однак особливістю магістрального трубопроводу є лінійна протяжність на багато сотень і тисяч кілометрів, внаслідок чого однотипне обладнання може знаходитися на значній відстані один від одного і доставка запасних частин з резерву до місця використання може вимагати значних витрат часу. Цей фактор слід враховувати при визначенні загального рівня резерву і вибору пунктів, в яких повинні розміщуватися запасні частини.

В якості критерію оптимальності при призначенні резерву запасних частин можна взяти розрахункові витрати, що враховують затрати

на створення і зберігання резерву, збитки від затримок доставки запасних частин до місця використання і збитки, що наносяться трубопроводу через відсутність запасних частин при його пошкодженні.

Розглянемо задачу забезпечення резервом  $n$  одиниць однотипного обладнання, розташованих в точках  $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ . Очевидно, що розрахунок резерву може проводитися окремо для кожного виду однотипного обладнання. При сформованій системі планування виділення фондів запасних частин і устаткування зазвичай проводиться на один рік, тому розрахунки можна проводити виходячи з умови, що поповнення резерву до рівня  $x$  проводиться один раз на рік.

При найбільшій величині резерву запасних частин, рівній  $x$  одиниць, збитки від недостатнього рівня резерву будуть мати місце щоразу, коли загальна потреба в запасних частинах  $m$  ( $m=0,1,2,\dots$ ) за аналізований період буде більше резерву, тобто при  $m > x$ . Якщо позначити через  $p_m$  ймовірність виникнення вимоги на  $m$  одиниць запасних частин для всього трубопроводу, то математичне сподівання числа незадоволених вимог складе

$$M = \sum_{m=x+1}^{\infty} (m-x)p_m. \quad (12)$$

Тоді при величині втрат, які виникають внаслідок відсутності одиниці запасного обладнання, рівних  $c_2$ , збитки від недостатнього рівня резерву складуть

$$y = c_2 \sum_{m=x+1}^{\infty} (m-x)p_m. \quad (13)$$

Знаходження величини  $c_2$  може бути виконано з урахуванням конкретних умов експлуатації обладнання і його відповідальності. У тому випадку, коли відсутність запасних частин веде до простою всієї системи трубопроводу або його частини, рівному проміжку часу, протягом якого необхідне обладнання вишукуються з інших зовнішніх джерел, величину  $c_2$  можна оцінити наступним чином

$$c_2 = c_0 T,$$

де  $c_0$  – збитки, що наносяться народному господарству за рахунок простою трубопроводу (або його частини) за одиницю часу;  $T$  – час необхідний для вишукування запасного обладнання.

У деяких випадках через відсутність резервного обладнання трубопровід може працювати за тимчасовою схемою. Надалі, для забезпечення нормальної експлуатації, виникає необхідність переходу на основну схему роботи. Цей перехід може бути здійснений тільки при зупинці трубопроводу або його частини, у зв'язку з чим будуть мати місце певні збитки від простою. У цьому випадку величину  $c_0$  оцінюємо виразом

$$c_2 = c_0 t,$$

де  $t$  – час простою трубопроводу (або його частини), пов'язаний з переходом на роботу за загальною схемою.

У тих випадках, коли можливі обидва рішення, за оцінку можна прийняти меншу з величин (12), (13).

Збитки, нанесені трубопроводу від наявності невикористаного обладнання можна визначити за формулою

$$y = c_1 x, \quad (14)$$

де  $c_1$  – витрати на створення і зберігання одиниці запасного обладнання, які можна подати в наступному вигляді:

$$c_1 = KE + c,$$

де  $K$  – вартість одиниці запасного обладнання;  $E$  – нормативний коефіцієнт економічної ефективності;  $c$  – складські витрати (витрати на зберігання і переконсервацію обладнання).

Крім того, при визначенні величини  $c_1$  в деяких випадках може виявитися доцільним облік старіння і морального зносу обладнання, що знаходиться на зберіганні.

Розглянемо питання про збитки нанесені трубопроводу внаслідок втрат, пов'язаних з транспортуванням запасних частин. При експлуатації протягом проміжку часу між моментами поповнення резерву кожен об'єкт (обладнання) може вимагати  $m$  одиниць запасних частин ( $m=0,1,2,\dots$ ) і ця потреба може бути охарактеризована ймовірністю  $p_m$ , причому

$$\sum_{m=0}^{\infty} p_m = 1; \quad \sum_{m=0}^{\infty} m p_m = \lambda_0,$$

де  $\lambda_0$  – математичне сподівання потреби в запасних частинах для кожного об'єкта.

Тоді при середній швидкості транспортування запасних частин, рівній  $v$ , збитки, що розглядаються для  $n$  одиниць обладнання, складуть

$$y_3 = n \sum_{m=1}^x \frac{c_0}{v} m p_m L_m(x), \quad (15)$$

де  $L_m(x)$  – середня відстань підвезення  $m$  запасних частин, яку можна отримати наступним чином.

Трубопровід ділиться на  $x$  ділянок так, щоб на кожній з них було  $n/x$  одиниць обладнання. Якщо  $n/x$  дробове, то число одиниць обладнання на кожній ділянці заокруглюється в меншу сторону.

Розміщення одиничного резерву на кожній такій ділянці повинно бути виконано таким чином, щоб середня відстань, на яку необхідно підвозити запасні частини, була мінімальною.



Місцезнаходження резерву може бути знайдено як «центр ваги» системи об'єктів, розміщених на одній прямій, при цьому координати розміщення резервів  $Z_j (j=1, x)$  складуть

$$Z_j = \frac{\sum_{i=n_{j-1}+1}^{n_j} y_j}{n_j - n_{j-1}}, \quad (16)$$

де  $n_j = E(jn/x)$  – ціла частина дробового числа  $(jn/x)$ .

Отримані значення  $Z_j$  заокруглюємо до координат розміщення перекачувальних станцій або аварійно-відновлювальних пунктів. Тоді, у випадку виникнення вимоги на  $m$  запасних частин  $i$ -го об'єкта середня відстань підвезення складе

$$l_{im} = \frac{\sum_{j=1}^m l_j}{m},$$

де  $l_j (j=1, x)$  – ряд відстаней від  $j$ -го пункту до місць розташування резервів, взятих в порядку зростання.

З урахуванням викладеного в середньому по трубопроводу величину  $L_m(x)$  можна оцінити сумою

$$L_m(x) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_{jm}. \quad (17)$$

Таким чином, отримано наближену оцінку для віддалей підвезення запасних частин.

З урахуванням викладеного постановку задачі вибору і розміщення резерву можна записати у вигляді

$$\min \left[ c_1 x + c_2 \sum_{m=x+1}^{\infty} (m-x) p_m n \frac{c_0}{v} \sum_{m=1}^x m p_m L_m(x) \right]. \quad (18)$$

Оптимізація (18) може бути виконана методом послідовних наближень. У першому наближенні задачу можна подати у вигляді

$$\min \left[ c_1 x + c_2 \sum_{m=x+1}^{\infty} (m-x) p_m \right]. \quad (19)$$

Отримане значення  $x$  дозволяє з допомогою (16-18) визначити  $L_m(x)$  і розв'язати задачу в постановці (18). Наступні ітерації дають уточнення значення  $x$ , а остаточним результатом є значення  $x$ , яке співпадає у двох суміжних ітераціях.

Таким чином, запропоновані підходи дозволяють розвинути методику централізованого обслуговування газотранспортних систем у складних трасових умовах і забезпечити достатній рівень надійності їх експлуатації.

*Література*

1. Грудз В.Я. Обслуживание газотранспортных систем / В.Я. Грудз, Д.Ф. Тымкив, Е.И. Яковлев. – К.: 1991. – 160 с.
2. Обслуговування і ремонт магістральних газопроводів / В.Я. Грудз, Д.Ф. Тимків, В.Б. Михалків, В.В. Костів. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2009. – 711 с.
3. Технічна діагностика трубопровідних систем / В.Я. Грудз, Я.В. Грудз, В.В. Костів та ін. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2012. – 512 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 18.04.2018 р.*

*Рекомендовано до друку д.т.н., професором Тимківим Д.Ф.  
д.т.н., професором Говдяком Р.М. (м. Київ)*

### INCREASE OF EFFICIENCY TECHNICAL MAINTENANCE OF MAIN GAS PIPELINES

**V. Ya. Grudz, Ya. V. Grudz, V. P. Bodnar, T. F. Tutko**

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;  
76019, Ivano-Frankivsk, Carpathian str., 15;  
e-mail: snp@nung.edu.ua*

*The issues of increasing the reliability of operation of gas transportation systems in difficult conditions through the reformation and optimization of the maintenance system are considered, the principles and basic mathematical models of optimization of the location of spare parts bases along the pipeline route are given, taking into account the conditions of their delivery to the places of liquidation of emergency situations.*

**Key words:** *main gas pipeline, maintenance, optimization, mathematical model.*