Наука — виробництву

УДК 622.692.4

DOI: 10.31471/1993-9973-2019-4(73)-85-90

ОПТИМАЛЬНА ПЕРІОДИЧНІСТЬ ОЧИЩЕННЯ ГАЗОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

¹В. Я. Грудз, ²Н. Б. Слободян*

¹ІІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, (0342) 727138,
e-mail: v.grudz@nung.edu.ua

²АТ “Івано-Франківськгаз”; 76010, м. Івано-Франківськ, вул. Ленкавського, 20, тел. (0342) 586274,
e-mail: nazar.slobodian28@gmail.com

Розглядаються техніко-економічні аспекти підвищення гідравлічної ефективності трубопровідного транспорту. Гідравлічна ефективність газотранспортних систем прямо відображає їхню економічну ефективність та доцільність, а також процес «старіння» магістральних газопроводів з плином часу. Одним із ефективних методів підвищення гідравлічної ефективності газопроводу є періодичні його очищення із застосуванням механічних очисних пристроїв. Процес очищення газотранспортних систем за допомогою очисних поршнів є технологічно складним і дорогим. Тому при його плануванні необхідно створити всі умови, які б забезпечували максимальну ефективність очищення та економічну доцільність. Зі збільшенням кількості очищень газотранспортних систем зростає їхня гідравлічна ефективність, що призводить до збільшення прибутку газотранспортних організацій. Водночас витрати на очищення зменшують прибуток газотранспортних організацій. Отже, кількість очищень газопроводів та газотранспортних систем повинна бути оптимальною за певний період. Проаналізовано показники оцінки економічної ефективності заходів очищення внутрішньої порожнини газопроводів. Авторами встановлено, що більш вагомих показників оцінки заходів очищення газопроводу є збільшення загального прибутку газотранспортного підприємства. Досліджено залежність прибутку газотранспортного підприємства від кількості очищень газопроводу за певний період. Запропоновано методiku визначення оптимальної періодичності очищення газотранспортних систем. Побудовано математичну модель процесу, на основі реалізації якої отримано трансцендентне рівняння для знаходження оптимальної кількості очищень газотранспортних систем за певний період експлуатації. Запропоновано графоаналітичний метод для його розв'язку. На основі проведених розрахунків побудовано графічну залежність оптимальної періодичності очищення газотранспортних систем.

Ключові слова: гідравлічна ефективність, газопроводи, оптимальна періодичність, очищення, очисний поршень, очищення газопроводів, економічна ефективність, прибуток.

Рассматриваются технико-экономические аспекты повышения гидравлической эффективности трубопроводного транспорта. Гидравлическая эффективность газотранспортных систем непосредственно указывает на их экономическую эффективность и целесообразность, а также процесс «старения» магистральных газопроводов со временем. Одним из эффективных методов повышения гидравлической эффективности газопровода являются периодические его очистки с применением механических очистных устройств. Процесс очистки газотранспортных систем с помощью очистных поршней является технологически сложным и дорогостоящим. Поэтому при его планировании необходимо создать все условия, обеспечивающие максимальную эффективность и экономическую целесообразность. С увеличением количества очисток газотранспортных систем возрастает их гидравлическая эффективность, что приводит к увеличению прибыли газотранспортных организаций. Однако увеличивающиеся расходы на проведение очисток приводят к уменьшению прибыли газотранспортных организаций. Следовательно, количество очисток газопроводов и газотранспортных систем должна быть оптимальной за определенный период. Проанализи-

зоровані показателі оцінки економічної ефективності заходів очищення внутрішньої частини газопроводів. Авторами встановлено, що більш конкретним показателем оцінки заходів очищення газопроводу є збільшення загальної прибутку газотранспортного підприємства. Досліджено залежність прибутку газотранспортного підприємства від числа очищень газопроводу за певний період. Представлено методику визначення оптимальної періодичності очищення газотранспортних систем. Побудовано математичну модель процесу, на основі реалізації якої отримано трансцендентне рівняння для знаходження оптимального числа очищень газотранспортних систем за певний період експлуатації. Представлено графоаналітичний метод для його розв'язання. На основі проведених розрахунків побудовано графічну залежність оптимальної періодичності очищення газотранспортних систем.

Ключові слова: гідрравлічна ефективність, газопроводи, оптимальна періодичність, очищення, очищувальний поршень, очищення газопроводів, економічна ефективність, прибуток.

The technical and economic aspects of improving the hydraulic efficiency of pipeline transmission are considered. Hydraulic efficiency of gas transmission systems reveals directly their economic efficiency and practicability, as well as the process of "aging" of the main gas pipelines over time. One of the effective methods of improving the hydraulic efficiency of a gas pipeline is its periodical cleaning with the use mechanical cleaning units. The process of cleaning gas transmission systems with cleaning pistons is technologically complicated and expensive. Therefore, when planning, it is necessary to create all the conditions that guarantee maximum cleaning efficiency and are cost-effective. The increase of the number of gas pipeline cleanings improves the hydraulic efficiency of the systems. It increases the profit of gas transmission organizations. As a result, the cost for cleaning goes up and leads to the decrease of profit of the gas transportation companies. Therefore, the number of cleanings of gas pipelines and gas transmission systems should be equal to the optimum number of cleanings over a period of time. The indices of economic efficiency of gas pipelines pigging are analyzed. The authors find that a more specific indicator of the evaluation of gas pipeline cleaning procedure is the increase in the total profit of the gas transmission company. The dependence of the gas transmission company profit on the number of gas pipeline cleaning over a certain period of time is investigated. The method of specifying the optimal periodicity of gas transmission systems cleaning is offered. The mathematical model of the process is constructed. On the basis of the model, a transcendental equation for finding the optimal number of gas transportation system cleanings for a certain lifetime is obtained. A grapho-analytical method for the solution of the equation is offered. Based on the calculations, a graphical dependence of the optimal periodicity of gas transmission systems cleaning is constructed.

Key words: hydraulic efficiency, gas pipelines, optimal periodicity, cleaning, cleaning piston, gas pipeline cleaning, economic efficiency, profit.

Вступ

Підвищення гідрравлічної ефективності газопроводу чи газотранспортної системи обов'язково призведе до покращення економічних показників експлуатації газової магістралі за рахунок зменшення гідрравлічного опору лінійної частини. Звідси і збільшення обсягів перекачування газу і зменшення питомих енерговитрат на транспортування. Як відомо, очищення газотранспортних систем від різного роду забруднень підвищує їхню гідрравлічну ефективність. Мета роботи визначити оптимальну кількість очищень газопроводу за певний період.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Відомо [1,2,3,4,5,6], що економічну ефективність заходів очищення газопроводу запропоновано оцінювати показником, що вказує на загальні затрати на один відсоток підвищення гідрравлічної ефективності. Однак він не є показовим, оскільки за низького початкового значення гідрравлічної ефективності газопроводу він має суттєво іншу величину, ніж при високому. Тому більш конкретним показником оцінки заходів з очищення газопроводу є збіль-

шення загального прибутку газотранспортного підприємства. Цей підхід використано в [2,7,8,9] з метою оптимізації періодичності очищень.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Зауважимо, що збільшення числа профілактичних очищень за певний період часу призведе до зростання середньої гідрравлічної ефективності газопроводу за цей період часу. Цей висновок чітко коригується з фізичними уявленнями про гідрравлічну ефективність і процеси її підвищення. Очевидно, що збільшення частоти очищення газопроводу (тобто збільшення числа пропуску очисних пристроїв) приведе до підвищення гідрравлічної ефективності.

Підвищення гідрравлічної ефективності газопроводу приведе до збільшення обсягів перекачки газу, а отже, до збільшення прибутку газотранспортного підприємства. Таким чином, збільшення числа очищень газопроводу за період часу експлуатації приведе до зростання прибутку газотранспортного підприємства.

З іншого боку, процес очищення газопроводу пов'язаний з певними витратами на його

проведення. Сюди слід віднести витрати на очисні пристрої, витрати газу в процесі очищення, зменшення пропускної здатності газопроводу чи газотранспортної системи в період руху очисного пристрою. Тому збільшення числа очисток газопроводу за певний період часу призведе до збільшення виробничих витрат і, отже, до зменшення прибутку газотранспортного підприємства.

Формулювання цілей статті

Аналізуючи вище викладене, зауважимо, що збільшення числа пропуску очисних поршнів призводить, як до збільшення прибутку газотранспортного підприємства, так і до його зменшення. Тому в кожному конкретному випадку слід встановити оптимальну періодичність очистки газотранспортних систем, яка б засвідчувала свою економічну доцільність.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Періодичність проведення очисток визначається багатьма факторами експлуатації газотранспортної системи. Найбільш істотним з них слід вважати темп падіння гідравлічної ефективності в часі.

Оптимальна періодичність проведення профілактичних очисток залежить від критерію оптимальності, екстремум якого задовольняє умовам проведення періодичних пропусків очисних засобів з метою підвищення гідравлічної ефективності. В літературі [2] розглядаються питання оптимальної періодичності очищення простих газопроводів. При цьому критеріями оптимальності вибираються енергетичні витрати на транспорт та загальний прибуток газотранспортного підприємства. Очевидно, що останній критерій – загальний прибуток підприємства найбільш повно відображає техніко-економічні стосунки. Тому за критерій оптимальності приймається загальний прибуток підприємства з врахуванням витрат на проведення профілактичних очисток. Таким чином, функція мети може бути побудована в вигляді:

$$\Pi = f(c, E, s, n), \quad (1)$$

Π – загальний прибуток підприємства;

c – різниця між закупівельною ціною на газ та вартістю його реалізації (з урахуванням собівартості транспорту);

E – гідравлічна ефективність газотранспортної системи;

S – затрати на одне очищення;

n – число очисток газопроводів за період часу експлуатації T .

Якщо розглядати період експлуатації $T=1$ рік, то прибуток газотранспортного підприємства складе

$$\Pi = cQ_T T E_{cp}, \quad (2)$$

Q_T – теоретична пропускна здатність системи газопроводів;

E_{cp} – середня за рік гідравлічна ефективність системи.

Розглянемо вплив гідравлічної ефективності газотранспортної системи на загальний прибуток газотранспортного підприємства. В першу чергу, слід відмітити, що середнє значення гідравлічної ефективності необхідно розуміти як середньоінтегральне, тобто:

$$E_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T E(t) dt. \quad (3)$$

Якщо за період часу T проводилось n очисток газопроводу і в результаті кожної гідравлічна ефективність підвищувалась до однакового рівня E_0 , а потім знижувалась з однаковим темпом, то з метою визначення середньої ефективності достатньо розглядати один з проміжків часу тривалістю T/n і зробити узагальнення для всього періоду T . Тоді середнє значення гідравлічної ефективності буде дорівнювати

$$E_{cp} = \frac{n}{T} \int_0^{T/n} E(t) dt. \quad (4)$$

Наведений аналіз свідчить, що зі збільшенням кількості очищень газопроводу за проміжок часу T , з одного боку, зростає гідравлічна ефективність систем, що призводить до збільшення прибутку газотранспортного підприємства. З іншого боку, зростають виробничі витрати на проведення очисток, що призводить до зменшення прибутку газотранспортного підприємства. Отже, прибуток газотранспортного підприємства, як функція числа очисток газопроводу за проміжок часу T повинна мати екстремум, якому відповідатиме оптимальне число очисток газопроводу за проміжок часу T . А це означає, що функція мети для визначення оптимальної періодичності очисток газопроводу може бути записана у вигляді

$$\Pi = cQ_T n \int_0^{T/n} E(t) dt - sn. \quad (5)$$

Тоді оптимальна періодичність очищень газопроводу може бути знайдено шляхом диференціювання рівняння (5):

$$\frac{\partial \Pi}{\partial n} = 0. \quad (6)$$

Для реалізації поставленої задачі необхідно знати вигляд функції $E(t)$ для газотранспортної системи. Як було показано вище, така функція може бути побудована на основі періодичних спостережень за гідравлічною ефективністю газотранспортної системи. Така функція має вигляд

$$E(t) = E_0 e^{-\lambda t} (\cos \beta t + \sin \beta t). \quad (7)$$

Підставляючи цей вираз в рівняння функції мети, одержимо

$$\Pi = c Q_T n E_0 \int_0^T e^{-\lambda t} (\cos \beta t + \sin \beta t) dt - sn. \quad (8)$$

Виконавши інтегрування по частинах, після нескладних перетворень отримаємо

$$\Pi = \frac{c Q_T n E_0}{T(\lambda^2 + \beta^2)} \left[e^{-\lambda \frac{T}{n}} (\beta - \lambda) \sin \left(\beta \frac{T}{n} \right) - (\beta + \lambda) \cos \left(\beta \frac{T}{n} \right) + (\beta + \lambda) \right] - sn. \quad (9)$$

Похідна $\frac{\partial \Pi}{\partial n}$ дозволить отримати трансцендентне рівняння для знаходження оптимального числа профілактичних очисток за період експлуатації T у вигляді

$$e^{-\lambda \frac{T}{n}} \left[(\beta - \lambda) \sin \left(\beta \frac{T}{n} \right) - n(\beta - \lambda) \times \left(\lambda \sin \left(\beta \frac{T}{n} \right) + \frac{\beta T}{n^2} \cos \left(\beta \frac{T}{n} \right) \right) - (\beta + \lambda) \cos \left(\beta \frac{T}{n} \right) + n(\beta + \lambda) \left(\lambda \cos \left(\beta \frac{T}{n} \right) - \frac{\beta T}{n^2} \sin \left(\beta \frac{T}{n} \right) \right) \right] - \frac{s(\lambda^2 + \beta^2)T}{c Q_T E_0} - d = 0. \quad (10)$$

Аналітичний вираз розв'язку одержаного рівняння знайти неможливо. Тому для реалізації задачі пропонується графоаналітичний метод, який базується на тому, що ліва частина рівняння є безрозмірною функцією кількості профілактичних очищень $t(n)$, а права частина – сталою величиною d . Тоді рівняння може бути записано у вигляді

$$f(n) = d. \quad (11)$$

Задаючись рядом значень кількості очищень за період T , будуюмо графік залежності $y=f(n)$. На осі ординат відкладаємо сталу величину d і будуюмо графік функції $y=d$. Абсциса точки перетину побудованих графів відповідає кореневі одержаного рівняння і, отже, є оптимальною періодичністю профілактичних очисток газотранспортної системи.

З метою апробації запропонованої методики визначення оптимальної періодичності очистки газотранспортних систем, проведені розрахунки для системи газопроводів “Братерство” за даними на 1986 рік і системи Союз-Уренгой-Помари-Ужгород за даними на 1989 р. У вказаний період газопровідна система “Братерство” складалось з двох паралельних ниток ДУГ-1 діаметром 820 мм і ДУГ-2 діаметром 1420 мм, з'єднаних міжнитковими перемичками. Газопроводи Союз та Уренгой-Помари-Ужгород на цей період також складали двониткову систему, оскільки газопровід Прогрес в цей час не експлуатували.

Беручи до уваги недозавантаження систем магістральних газопроводів за критерій оптимальності, приймають енергетичні витрати на транспорт.

Якщо при відомій подачі перекачування Q потрібно забезпечити мінімальні енергетичні витрати на транспортування, тоді оптимальна періодичність профілактичних очисток буде рівна

$$\frac{\partial Z}{\partial n} = 0, \quad (12)$$

Z – енергозатрати на транспортування природного газу для газопроводу з компресорними станціями з врахуванням кількості продувок.

$$Z = \tau N_{\Sigma} + nS; \quad (13)$$

τ – період експлуатації;

N_{Σ} – сумарна потужність всіх компресорних станцій;

S – затрати на одну продувку.

Якщо потужність i -ї компресорної станції виразити із рівняння політропного стиснення із показником політропи m тоді отримаємо

$$Z = \tau Q \frac{m}{m-1} \sum_{i=1}^K \frac{Z_{B_i} T_{B_i}}{\eta_i} \left[\left(\frac{P_{B_i}}{P_{B_{i+1}}} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right] + nS. \quad (14)$$

Значення тисків P_{B_i} та $P_{B_{i+1}}$ при стаціонарному режимі перекачування зв'язані між собою співвідношенням

$$P_{B_i}^2 = P_{B_{i+1}}^2 + c_i E_{cp}^2 Q^2. \quad (15)$$

Підставивши рівняння (15) у рівняння (14), отримаємо

$$Z = \tau Q \frac{m}{m-1} \times \sum_{i=1}^K \frac{Z_{B_i} T_{B_i}}{\eta_i} \left[\left(\frac{(P_{B_{i+1}}^2 + c_i E_{cp}^2 Q^2)^{1/2}}{P_{B_i}} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right] + nS. \quad (16)$$

Рисунок 1 – Залежність оптимальної періодичності очистки газотранспортних систем

Виразивши через кількість профілактичних продувок n , запишемо

$$3 = nS + \tau Q \frac{m}{m-1} \times \left(\frac{\sum_{i=1}^K \frac{Z_{B_i} T_{B_i}}{\eta_i} \left(\frac{P_{B_{i+1}}^2 + c_i Q^2 \left(\frac{n}{\tau} \int_0^n E(t) dt \right)^2}{P_{B_i}} \right)^{1/2}}{P_{B_i}} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \quad (17)$$

Рівняння (17) із врахуванням рівняння (12) закладено в основу розрахунку оптимальної періодичності очищень газопроводу Союз. При цьому характер зміни гідравлічної ефективності у часі був визначений на основі викладеної методики.

В [2] наведено результати розрахунків оптимальної періодичності очищень газопроводу ДУГ-2, газопроводу Союз та газопроводу Уренгой-Помари-Ужгород, вважаючи ці газопроводи однопоточковими. Запропонована методика розрахунку дозволяє розрахувати оптимальну періодичність очищення цих газопроводів, враховуючи, що вони складають єдину систему. На рисунку 1 наведено графічні залежності, що дозволяють визначити оптимальну періодичність очищень газопроводів як ниток системи.

Для газопровідної системи Братерство оптимальна періодичність очищень за даними графоаналітичного розрахунку становить 1,5 очищень на рік, а для газопровідної системи Союз-Уренгой-Помари-Ужгород 1,3 очищення на рік.

В таблиці 1 наведено результати розрахунку оптимальної періодичності очищень вказаних газопроводів за даними [2] і розробленою методикою.

Результати розрахунків свідчать, що для газопроводів, що входять в газотранспортну систему, оптимальна періодичність очищень менша, ніж для окремих простих газопроводів, не зважаючи на те, що витрати на очищення газопроводу системи менші, ніж витрати на очищення окремого газопроводу за рахунок зменшення витрат газу в процесі очищення. Цей факт пояснюється тим, що для газотранспортної системи за рахунок перерозподілу рідини між паралельними нитками протягом сезонів темп падіння гідравлічної ефективності значно нижчий, ніж для окремого газопроводу.

Висновки

Для знаходження оптимальної періодичності очисток газопроводу за певний період його експлуатації побудовано математичну модель процесу, на основі якої отримано трансцендентне рівняння. Розв'язок запропонованого рівняння доцільно отримати графоаналітичним

Таблиця 1 – Визначення оптимальної періодичності очисток газопроводів

Газопровід	Діаметр, мм	Довжина, км	Оптимальна періодичність очищень на рік		
			За даними [2]		За розробленою методикою
			Загальний прибуток	Енергетичні затрати	
Братерство					
ДУГ-1	820	102,2	2,4	4,6	1,5
ДУГ-2	1420				
Союз	1420	142,0	1,8	3,3	1,3
Уренгой-Помари-Ужгород	1420	127,9	2,1	4,2	

або іншим ітераційним методом. В результаті отримано оптимальну кількість профілактичних очищень за різними критеріями оптимальності. На основі одержаних розрахункових результатів приймаються командні рішення про кількість профілактичних очищень на рік.

Література

1. Александров А.В., Яковлев Е. И. Проектирование и эксплуатация систем дальнего транспорта. М.: Недра. 1972. 432 с.
2. Грудз В.Я., Тымків Д. Ф., Яковлев Е. И. Обслуживание газотранспортных систем. К.: УМК ВО. 1991. 159с.
3. Кесельман Г. С., Махмудбеков Э. А. Защита окружающей среды при добыче, транспорте и хранении нефти и газа. М.: Недра, 1981. 256 с.
4. Ходанович И. Е. Об эффективности продувки газопровода. *Газовая промышленность*. 1958. № 3. С. 24–25.
5. ШигOLEV Б. М. Математическая обработка наблюдений. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. 344 с.
6. Яковлев Є.І., Козак О.С., Михалків В.Б., Тимків Д.Ф., Грудз В.Я. Режими газотранспортних систем. Л.: Світ, 1992. 198с.
7. Грудз В. Я., Переяслов В. Н., Хизгилов И. Х. Влияние скорости очистных устройств на эффективность продувки газопроводов. *Нефтяная и газовая промышленность*. 1974. № 6.
8. Грудз В. Я. Исследование эффективности очистных устройств в газопроводах с пересеченным профилем трассы: диссертационная работа на соискание ученой степени к.т.н., Ивано-Франковськ, 1980.
9. Грудз В. Я., Калин С. И. Вплив теплового режиму газопроводу на ефективність його роботи. *Розвідка і розробка газових родовищ*. 1993. Вип. 31.

References

1. Aleksandrov A.V. Yakovlev E.I. Proektirovanie i ekspluatatsiya sistem dailnego transporta. Moscow: Nedra, 1972. 432 p. [in Russian].
2. Grudz V.Ya., Tymkiv D.F. Yakovlev E.I. Obsluzhivanie gazotransportnyh sistem. Kiev: UMKVO, 1991. 159 p. [in Russian].
3. Keselman G.S. Mahmudbekov E.A. Zashita okruzhayushey sredy pri dobyche, transporte i hranenii nefiti i gaza. Moscow: Nedra, 1981. 256 p. [in Russian].
4. Hodanovich I.E. Ob effektivnosti produvki gazoprovodov. *Gazovaya promyshlennost*. 1958. no. 3. [in Russian].
5. Shigolev B.M. Matematicheskaya obrabotka nablyudeniy [Mathematical processing of observations]. Moscow: Nauka, 1969. 334 p. [in Russian].
6. Yakovlyev Ye.I., Kozak O.S., Myhalkiv V.B., Timkiv D.F., Grudz V.Ya. Rezhimi gazotransportnih sistem. Lviv: Svit, 1992. 198 p. [in Ukrainian].
7. Grudz V.Ya., Pereyaslov V.N., Hizgilov I.H. Vliyanie skorosti ochisnyh ustroystv na effektivnost produvki gazoprovodov. *Neftyanaya i gazovaya promyshlennost*. 1974. no. 6. [in Russian].
8. Grudz V.Ya. Issledovanie effektivnosti ochisnyh ustroystv v gazaprovodah s peresechenym profilem trassy. Thesis for the degree of candidate of technical sciences, Ivano-Frankovsk, 1980. [in Russian].
9. Hrudz V.Ya., Kalyn S.Y. Influence of the thermal regime of the gas pipeline on the efficiency of its operation. *Rozvidka i rozrobka hazovyykh rodovyyshch*. 1993.Vol. 31 [in Ukrainian].