

4 Белима А.С., Большевцев А.Д., Гребень И.И. Теоретические основы централизованного контроля технологических процессов. – К.: Вища школа, 1973. – 242 с.

5 Николайчук Я.Н., Ширмовский Г.Я. Рациональное кодирование и концентрация данных в низовой сети АСУТП бурения // Автоматизация и телемеханизация нефтяной и газовой промышленности. – 1983. – №3. – С.7-8.

6 Грибанов Ю.И., Веселова Г.П., Андреев В.Н. Автоматические цифровые корреляторы. – М.: Энергия, 1971. – 240 с.

7 Таджибаев Т.М., Якубенков К.Д. Система диспетчерского телеконтроля и управления бурения скважин. – М.: ВНИИОЭНГ, 1985. – 44 с.

УДК 622.692.4

## ОСОБЛИВОСТІ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ КРАЙОВОЇ ЗАДАЧІ ПРИ РОЗРАХУНКУ НЕСТАЦІОНАРНИХ НЕІЗОТЕРМІЧНИХ ПОТОКІВ В МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДАХ

Ю.Г.Мельниченко, Д.Ф.Тимків

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 49358  
e-mail: informatik@nung.edu.ua

*Исследован вопрос математического описания нестационарного неизо термического потока в магистральных газопроводах. Предложен уточненный метод решения краевой задачи.*

*The questions of mathematical description of the unsteady nonisothermal flows in gas pipelines are studied. An improved method of solving the boundary problems is offered.*

При виконанні більшості технологічних розрахунків магістральних газопроводів припускають, що потік газу в кожній точці трубопроводної системи є незмінним в часі, тобто стаціонарним.

Враховуючи стрімкий розвиток технологічного обладнання та комп'ютерної техніки стає можливим накопичення інформації про роботу складних газотранспортних систем (ГТС) в режимі реального часу. Такі бази даних стають матеріалом, на основі якого можливо проводити безперервний контроль над роботою ГТС. Для проведення такого виду контролю повинна бути створена програма симуляції роботи системи. Основою такої програми повинен бути метод розрахунку нестационарного неізо термічного потоку газу в магістральному газопроводі. Запропоновано велику кількість методів визначення параметрів нестационарного неізо термічного потоку [1-3]. В найзагальнішому розумінні під методом визначення параметрів газотранспортної системи розуміють метод формулювання та ефективного розв'язування системи диференціальних рівнянь.

Розглянемо деяку ділянку магістрального газопроводу з відомими геометричними параметрами. Для нестационарного неізо термічного руху газу через ділянку газопроводу як диференціальні рівняння згаданої вище системи виступають закони збереження маси, кількості руху, енергії, а також рівняння теплопередачі та стану газу [1, 3]. Таким чином, для одиниці маси газу, що рухається в трубопроводі, запишемо

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho w) &= 0; \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial x} &= -\frac{\partial p}{\partial x} - \rho \frac{\xi \cdot w |w|}{2 \cdot D} - \rho g \frac{dh}{dx}; \\ \frac{\partial(\rho \cdot E)}{\partial t} + \frac{\partial \left[ \rho \cdot w \cdot \left( E + \frac{p}{\rho} \right) \right]}{\partial x} &= \\ &= \frac{4K}{D}(T_{o.c.} - T) - \rho \cdot g \cdot w \frac{dh}{dx}; \\ p &= \rho \cdot g \cdot z \cdot R \cdot T, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

де:  $\rho, P, T, w$  – газодинамічні параметри потоку: густина, тиск, температура та осереднена швидкість руху частинок газу по перерізу потоку відповідно;  $x, t$  – незалежні змінні: довжина та час відповідно;  $\xi$  – коефіцієнт гідравлічного опору;  $E$  – повна енергія одиниці маси газу;  $K$  – коефіцієнт теплопередачі від газу в оточуюче газопровід середовище;  $D$  – внутрішній діаметр ділянки газопроводу;  $h$  – геодезична висота осі трубопроводу;  $z$  – коефіцієнт стисливості газу.

Така система нелінійних диференціальних рівнянь в часткових похідних не може мати точного аналітичного рішення. Тому, розроблено ряд методів наближеного розв'язку таких систем [1, 2]. Для розв'язання даної системи диференціальних рівнянь застосуємо метод сіток з неявною схемою розбиття. Згідно з аналізом,

проведеним в роботі [2], при виникненні нестационарного збурення в газовому потоці швидкість, тиск і густина газу змінюються в часі значно швидше, ніж його температура. Враховуючи дану особливість та вибрану тематику статті, залишимо в системі (1) тільки перші два рівняння, при цьому прийнявши розподіл температури по довжині ділянки умовно сталим в часі, а густину — як функцію від тиску.

Прийнявши як масову витрату газу змінну  $M$ , побудуємо закон збереження кількості руху та закон збереження маси в диференціальній формі, як систему лінійних диференціальних рівнянь в часткових похідних відносно двох невідомих функцій: тиску —  $P(t,x)$  та масової витрати  $M(t,x)$

$$\begin{cases} \frac{\partial M}{\partial t} = a_1 \frac{\partial M}{\partial x} + a_2 \frac{\partial P}{\partial x} + a_3 M + a_4; \\ \frac{\partial P}{\partial t} = a_5 \frac{\partial M}{\partial x}, \end{cases} \quad (2)$$

де:  $a_1 = -w$ ;  $a_2 = -\frac{\pi D^2}{4}$ ;  $a_3 = -\frac{w\xi}{2D}$ ;

$$a_4 = -\frac{\pi D^2}{4} \rho \cdot g \cdot \frac{dh}{dx}; \quad a_5 = -\frac{1}{\left(\frac{\partial \rho}{\partial P}\right)}$$

Значення коефіцієнтів  $a_1$ – $a_5$  (як і значення температури газу) приймаються незмінними в часі і обчислюються згідно з прийнятою схемою розбиття.

Згідно з [2] для розв'язування системи диференціальних рівнянь виду (2) необхідно мати одну початкову та дві граничні умови. При цьому граничні умови повинні бути відомими на різних кінцях ділянки. Як граничні умови можуть бути прийняті дві різні або одні і ті ж невідомі функції. В розглядуваному випадку приймаємо наступні граничні умови:  $P(t,0)$ ;  $M(t,l)$ , де  $l$  — довжина ділянки трубопроводу.

Задача (2) є крайовою задачею. Необхідно мати одну початкову умову, тобто значення однієї з шуканих величин в момент часу  $t=0$ . В нашому випадку в момент часу  $t=0$  ми приймаємо, що по всій довжині ділянки потік стаціонарний, тобто незмінний в часі. Відомо, що стаціонарний потік середовища характеризується постійністю масової витрати по всій довжині ділянки. Тому, як початкову умову доцільно прийняти розподіл по всьому трубопроводу масової витрати. Якщо в момент часу  $t=0$  задано розподіл тиску, тобто другої невідомої функції системи (2), то розв'язавши класичну стаціонарну задачу при відомих значеннях тиску на початку та в кінці ділянки газопроводу, отримаємо значення масової витрати в газопроводі.

Для деякої точки на даній ділянці газопроводу  $x_i$  та для моменту часу  $t_{k+1}$  ( $i, k$  — аргументи дискретних значень незалежних параметрів на вибраних проміжках:  $i=1\dots n$ ;  $k=1\dots m$ ) застосуємо центрально-різницеву апроксимацію по змінній  $x$  та апроксимацію назад по змінній  $t$

(в напрямку зменшення змінної  $t$ ) системи (2)). При цьому друге рівняння системи продиференціюємо по змінній  $x$  та проведемо підстановку

значення диференціалу  $\frac{\partial P}{\partial x}$  в перше рівняння

системи (2), виключивши цим одну з шуканих функцій, а саме —  $P(t,x)$ . В результаті отримаємо різницевий аналог першого диференціального рівняння системи (2), зведеного до однієї змінної  $M(t,x)$  для деякої точки  $(t_{k+1}, x_i)$ :

$$\begin{aligned} & \frac{M(t_{k+1}, x_i) - M(t_k, x_i)}{\Delta t} = \\ & = a_1 \frac{M(t_{k+1}, x_{i+1}) - M(t_{k+1}, x_{i-1})}{2 \cdot \Delta x} + \\ & + a_2 a_5 \Delta t \frac{M(t_{k+1}, x_{i+1}) - 2M(t_{k+1}, x_i) + M(t_{k+1}, x_{i-1}))}{\Delta x^2} + \\ & + a_2 \frac{P(t_k, x_{i+1}) - P(t_k, x_{i-1})}{2 \cdot \Delta x} + \\ & + a_3 \cdot M(t_{k+1}, x_i) + a_4. \end{aligned} \quad (3)$$

Провівши деякі групування многочленів та заміни, отримаємо рівняння

$$\begin{aligned} & -B_1 \cdot M(t_{k+1}, x_{i+1}) + B_2 \cdot M(t_{k+1}, x_i) - \\ & - B_3 \cdot M(t_{k+1}, x_{i-1}) = B_4, \end{aligned} \quad (4)$$

де:  $B_1 = \frac{a_1}{2 \cdot \Delta x} + \frac{a_2 \cdot a_5 \cdot \Delta t}{\Delta x^2}$ ;

$$B_2 = \frac{1}{\Delta t} + \frac{2 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot \Delta t}{\Delta x^2} - a_3;$$

$$B_3 = \frac{a_2 \cdot a_4 \cdot \Delta t}{\Delta x^2} - \frac{a_1}{\Delta x \cdot 2};$$

$$B_4 = \frac{M(t_k, x_i)}{\Delta t} + a_2 \frac{P(t_k, x_{i+1}) - P(t_k, x_{i-1})}{2 \cdot \Delta x} + a_4.$$

Розбивши ділянку газопроводу на  $n$  точок по довжині ділянки і на  $m$  точок по часу отримаємо деяку сітку. Нехай початковий момент часу становить  $t_1$ . Тоді для моменту часу  $t_2$  можемо записати систему  $n$  рівнянь вигляду (4). Загалом такі системи рівнянь розв'язуються методом Гаусса, однак, враховуючи властивості матриці коефіцієнтів системи, тобто факт, що матриця є стрічковою тридіагональною, для її розв'язку доцільно застосувати метод прогонки як скорочений метод Гаусса. В роботі [1] детально розглянуто метод прогонки для розв'язування рівнянь виду (4). Зокрема як граничні вибрано: умову другого роду (умова Неймана) — на початку ділянки та граничну умову першого роду — на кінці ділянки (умова Діріхле).

Згідно з [1], пряма прогонка здійснюється шляхом перетворення рівняння (4) в рівняння вигляду

$$M(t_{k+1}, x_{i+1}) = E_{i+1} \cdot M(t_{k+1}, x_i) + F_{i+1}. \quad (5)$$

Для попередньої по ходу зростання значення  $x_i$  точки запишемо рівняння (5)

$$M(t_{k+1}, x_i) = E_i \cdot M(t_{k+1}, x_{i-1}) + F_i. \quad (6)$$

З рівняння (5) підставимо значення  $M(t_{k+1}, x_{i+1})$  в (4) і, провівши відповідне групування, отримаємо вираз

$$M(t_{k+1}, x_i) = \frac{B_3}{B_2 - B_1 \cdot E_{i+1}} M(t_{k+1}, x_{i-1}) + \frac{B_4 + B_1 F_{i+1}}{B_2 - B_1 E_{i+1}} \quad (7)$$

Порівнявши (6) і (7) ми отримаємо такі залежності:

$$E_i = \frac{B_3}{B_2 - B_1 \cdot E_{i+1}}; F_i = \frac{B_4 + B_1 F_{i+1}}{B_2 - B_1 E_{i+1}} \quad (8)$$

Якщо предствавити масову витрату в точці  $x_n$  (значення відоме згідно з прийнятими граничними умовами) як  $M(t_{k+1}, x_{i+1})$ , то вірність залежності (5) для будь-якого значення  $M(t_{k+1}, x_i)$  можлива тільки за таких умов

$$E_{i+1} = E_n = 0; F_{i+1} = F_n = M(t_{k+1}, x_{i+1}) \quad (9)$$

На основі залежності (9) за формулою (8) визначаємо значення коефіцієнтів  $E$  і  $F$  для точки  $i=n-1$ . Таким чином здійснюється пряма прогонка системи рівнянь виду (4) і перетворення її в систему рівнянь виду (5).

За наявності на початку ділянки газопроводу граничної умови другого роду, використовуючи вираз закону збереження маси з (2) для точки  $x_1$ , запишемо рівність

$$\frac{\partial P}{\partial t} = a_5 \frac{\partial M}{\partial x} \quad (10)$$

Згідно з [1] для точки  $x_1$  та моменту часу  $t_{k+1}$  проводиться апроксимація рівняння (10) назад по змінній  $t$  і вперед по змінній  $x$

$$\frac{M(t_{k+1}, x_2) - M(t_{k+1}, x_1)}{\Delta x} = a_5 \frac{P(t_{k+1}, x_1) - P(t_k, x_1)}{\Delta t} \quad (11)$$

Рівняння (11) спільно з рівнянням виду (5), записаного для точки  $x_2$  і моменту часу  $t_{k+1}$ , складають систему двох алгебраїчних рівнянь з двома невідомими  $M(t_{k+1}, x_2)$  і  $M(t_{k+1}, x_1)$ . Отримавши значення  $M(t_{k+1}, x_1)$  згідно з рівняннями вигляду (5) обчислюється значення масової витрати в кожній точці системи, здійснюючи таким чином обернену прогонку.

Посилаючись на [4], авторами статті пропонується для точки  $x_1$  та моменту часу  $t_{k+1}$  проводити апроксимацію рівняння (10) назад по змінній  $t$  та центрально-різницевою апроксимацію по змінній  $x$ . Тоді, рівняння (11) набуде вигляду

$$\frac{M(t_{k+1}, x_2) - M(t_{k+1}, x_0)}{2 \cdot \Delta x} = a_5 \frac{P(t_{k+1}, x_1) - P(t_k, x_1)}{\Delta t}, \quad (12)$$

де  $M(t_{k+1}, x_0)$  – масова витрата в уявній точці системи. Приймаємо, що уявна ділянка між точками 0 і 1 характеризується такими ж геометричними характеристиками (внутрішній діаметр труби, довжина, різниця геодезичних ви-

сот початку і кінця ділянки), як і ділянка між точками 1 і 2.

Отже, записавши разом рівняння (12) та рівняння вигляду (5) для обох ділянок, отримаємо систему трьох алгебраїчних рівнянь з трьома невідомими:  $M(t_{k+1}, x_0)$ ,  $M(t_{k+1}, x_1)$  і  $M(t_{k+1}, x_2)$ . Розв'язавши дану систему рівнянь, отримаємо основу для проведення оберненої прогонки та отримання розподілу масової витрати в трубопроводі в момент часу  $t_{k+1}$ .

За наведеною вище методикою проведено числовий експериментальний розрахунок нестационарного неізотермічного потоку газу в рівнинній ділянці газопроводу. Газопровід складається з двох послідовно з'єднаних ділянок з однаковими геометричними характеристиками. Досліджувалась перша ділянка довжиною 50 км з внутрішнім діаметром 1400 мм. До моменту виникнення нестационарного потоку в газопроводі був встановлений стаціонарний режим, який характеризувався тиском та температурою на вході в газопровід, рівними відповідно 5 МПа та 300 К, та масовою витратою, що дорівнювала 500 кг/с. В момент часу  $t=1200$  с тиск на вході в газопровід підвищили на 0,5 МПа. Відповідно, температуру на вході в газопровід та масову витрату на виході з нього підтримували сталими. Отже, починаючи від моменту часу  $t=1200$  с, в газопроводі спостерігається нестационарний режим руху газу. На рисунку 1 зображено розподіл тиску по довжині і в часі для заданої ділянки газопроводу.

На рисунку 1, а зображено розподіл тиску, отриманий при апроксимації граничної умови другого роду вперед по незалежній змінній  $x$  (в напрямку зростання  $x$ ). На рисунку 1, б зображено розподіл тиску, отриманий при центрально-різницевої апроксимації граничної умови другого роду по змінній  $x$ . Не складно помітити нестійкість результату при двох способах апроксимації граничної умови. Дана нестійкість пов'язана з неточністю внаслідок переходу від диференціальних рівнянь до їх різницевих аналогів. Однак, порівнюючи ці результати, не важко помітити, що при використанні центрально-різницевої апроксимації граничної умови амплітуда коливання значення тиску є значно менша амплітуди коливань тиску при апроксимації вперед. Більше того, досліджувалась динаміка результату розрахунку при більших значеннях часу. На рисунку 2 зображено розподіл тиску по довжині ділянки в момент часу  $t=10\ 000$  с для двох способів апроксимації другої крайової (граничної) умови.

При апроксимації вперед нестійкість поширюється по всій довжині газопроводу і набуває постійного значення. У випадку центрально-різницевої апроксимації, нестійкість з часом зменшується і через деякий період часу зникає взагалі. Крім того, не складно помітити, що осереднені значення обох розв'язків не співпадають.

Варто зазначити, що згідно умов експлуатації газотранспортних систем керованими параметрами є тиск, температура та масова

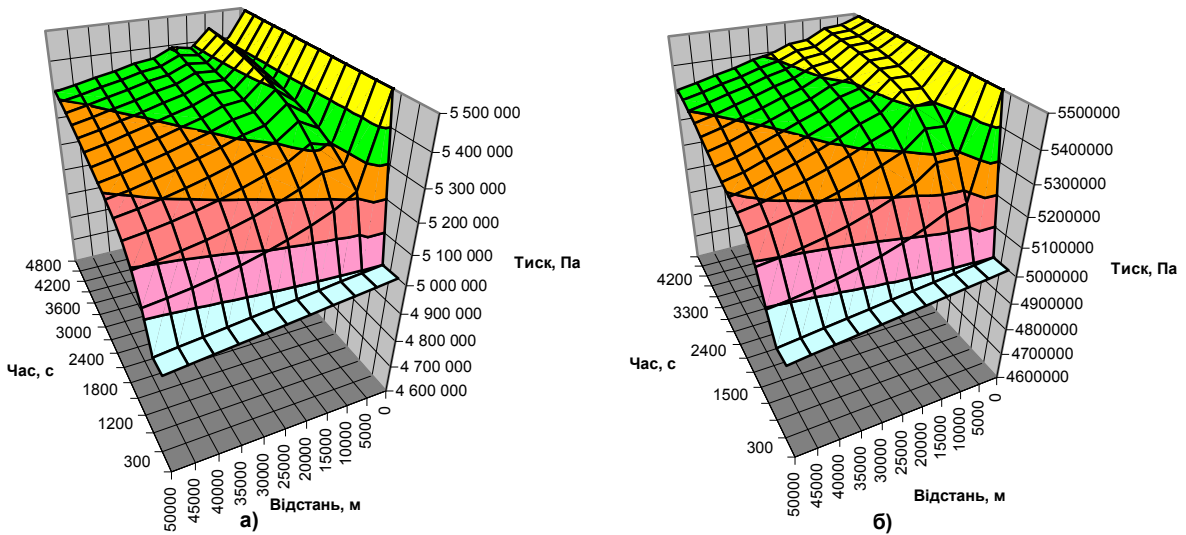


Рисунок 1 — Динаміка зміни з часом розподілу тиску по довжині ділянки газопроводу

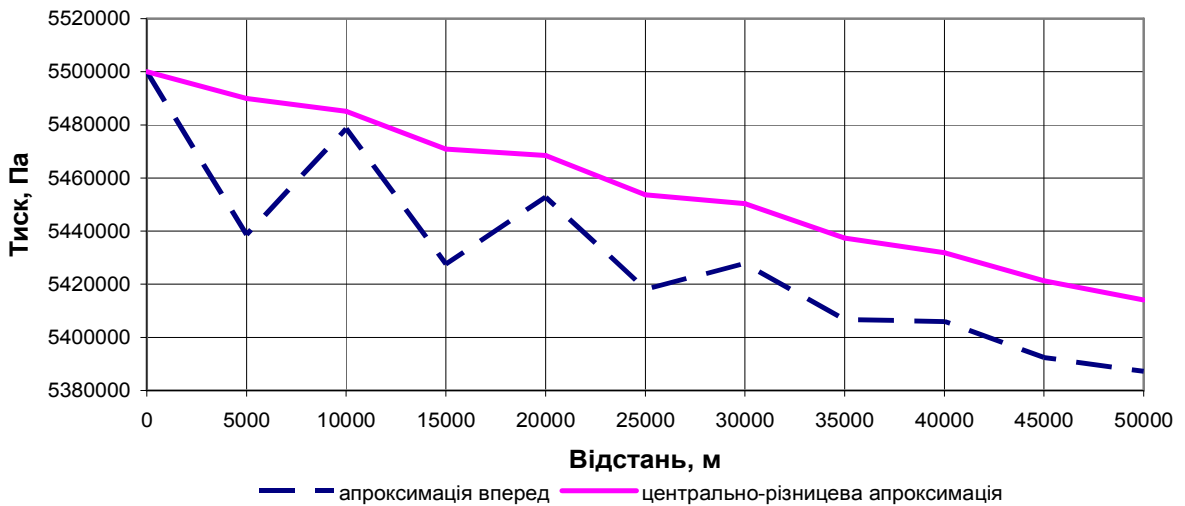


Рисунок 2 — Розподіл тиску газу по довжині ділянки газопроводу в момент часу  $t=10\,000\text{ с}$

витрата газу як на вході, так і на виході з газотранспортної системи, а також в деяких точках всередині газотранспортної системи. Контроль за безпечною роботою газопроводів в Україні проводиться в режимі реального часу шляхом недопущення перевищення тиску в лінійній частині газотранспортних систем вище їх допустимих значень. Відомо, що зміна одного з параметрів газотранспортної системи в довільній точці системи призводить до виникнення нестационарного процесу, що, залежно від інтенсивності збурення, передається по комунікаціях газотранспортної системи. На лінійній частині магістральних газопроводів України встановлені засоби телемеханіки, що фіксують такі процеси. Внаслідок зменшення нестійкості результату розрахунку крайової задачі (2) перед нами відкривається можливість отримати до певної міри чіткий та стійкий розподіл в часі і по довжині параметрів газотранспортної системи. Отже, стає можливим проведення безперервного порівняння даних, отриманих з засо-

бів телемеханіки з даними, отриманими при розрахунку газотранспортної системи з використанням приведеної методики розв'язку крайової задачі. Таке порівняння дозволяє нам проводити контроль не тільки щодо значення параметра, який контролюється, але й щодо характеру його зміни. Однак, для впровадження такого виду контролю роботи газотранспортних систем необхідно врахувати цілий ряд додаткових факторів та особливостей роботи реальних систем. До таких особливостей варто віднести ефективність, складність конфігурації газотранспортних систем, неоднорідність та нестационарність процесу теплообміну газу з оточуючим середовищем через стінки газопроводів тощо. Подолання наведених проблем можна віднести до перспектив розвитку методів розрахунку нестационарних неізотермічних режимів роботи газотранспортних систем.

Література

1 Яковлев Є.І., Казак О.С., Михалків В.Б., Тимків Д.Ф., Грудз В.Я. Режими газотранспортних систем. – Львів: Світ, 1992. – 172 с.  
 2 Гусейнзаде М.А., Юфин В.А. Неустановившеся движение нефти и газа в магистральных трубопроводах. – М.: Недра, 1981. – 321 с.

3 Химко М.П., Фролов В.А. та ін. Розрахунок параметрів газотранспортних систем // Нафтова і газова промисловість. – 2006. – № 3. – С. 33-37.  
 4 Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычисления. Ч. II. – М.: Физматгиз, 1962. – 487 с.

УДК 621.643.002

## ОЦІНКА ЗМІНИ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГАЗОПРОВОДУ В ПРОЦЕСІ ЙОГО ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Р.Т.Мартинюк, В.Я.Грудз, А.З.Багнюк

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422)  
 e-mail: publik@nuing.edu.ua

*Дана оцeнка кaчeствa фyнкцiонoвaння тpyбoпpoвoдa в пpoцeсe eгo eкcплyaтaцiї. Пpивeдeнe вiдoкpaтoв лiнeйнoї чacтини, iх кaрaктeрiстичeк i дoпyскi пo тeхнiчecким yмoвaм.*

*In the article it was given the mark of the function quality of the pipeline in the process of it exploitation. There were given kinds of refusals of line part and their characteristics and admissions for technical conditions.*

Початковий рівень якості лінійної частини газопроводу формується на стадії його проектування і спорудження, виходячи з основних конструктивних і проектних рішень, вибору обладнання, матеріалів та додержання технічних і технологічних норм в процесі будівництва. Надалі вплив експлуатаційних факторів призводить до старіння газопроводу, що проявляється в зниженні його конструктивно-технологічного потенціалу та відповідно призводить до появи відмов.

Початковий рівень якості  $K_0$  лінійної частини формується в процесі виготовлення висхідних матеріалів на стадії проектування трубопроводу і на етапі його будівництва. Важливу роль у формуванні початкового рівня якості також відіграє процес випробування лінійної частини, в ході якого виявляються грубі дефекти та помилки всіх попередніх етапів. Звідси  $K_0$  матиме вигляд

$$K_0 = f\left(\sum_{i=1}^n a_i^0, \sum_{i=1}^n b_i^0, \sum_{i=1}^n c_i^0, \sum_{i=1}^n d_i^0\right). \quad (1)$$

В процесі експлуатації (під дією чинників  $\sum_{i=1}^n e_i$ ) безперервно змінюється (знижується) рівень початкової якості:  $K = f(t)$ .

Зміна рівня якості в процесі експлуатації може бути представлена у вигляді

$$K_0 = f\left(\sum_{i=1}^n a_i^0, \sum_{i=1}^n b_i^0, \sum_{i=1}^n c_i^0, \sum_{i=1}^n d_i^0, \sum_{i=1}^n e_i; t\right). \quad (2)$$

де:  $\sum_{i=1}^n a_i^0, \sum_{i=1}^n b_i^0, \sum_{i=1}^n c_i^0, \sum_{i=1}^n d_i^0, \sum_{i=1}^n e_i$  – сукупність якості матеріалів, конструктивних і технологіч-

них факторів, а також факторів випробування і експлуатації;  $t$  – час експлуатації.

Така зміна якості лінійної частини трубопроводу призводить в кінцевому рахунку до відмови, час настання якої — випадкова величина.

За результатами спостережень потоку відмов трубопроводу в процесі його експлуатації може бути встановлений функціональний зв'язок між рівнем початкової якості лінійної частини і напрацюванням на відмову, наступною характеристикою  $H = f(K_0, t)$ .

Аналіз характеристик  $H = f(K_0, t)$  може створити необхідні умови для опису зворотного зв'язку функціонального переходу  $K_0 \rightarrow K_0'$ . Іншими словами, вдосконалення висхідних матеріалів проектування і будівництва трубопроводів дозволить перейти від початкового рівня якості  $K_0$  до більш високого рівня  $K_0'$ .

За накопиченою експлуатаційною інформацією про відмови лінійної частини трубопроводу доводиться вирішувати дві задачі. Перша з них — проводити статистичну оцінку експлуатаційних властивостей трубопроводу за результатами обмеженого числа спостережень. Друга задача — за результатами статистичної оцінки намітити заходи щодо підвищення працездатності лінійної частини.

Основним статистичним параметром лінійної частини трубопроводу служить параметр потоку відмов

$$\omega(t) \cong \frac{\sum_{i=1}^N m_i(t + \Delta t_i) - \sum_{i=1}^N m_i(t)}{N \Delta t}, \quad (3)$$