

ТРАНСПОРТ ТА ЗБЕРІГАННЯ НАФТИ І ГАЗУ

УДК 622.691.4

ОЦІНКА ВПЛИВУ НЕСТАЦІОНАРНОСТІ ГАЗОВОГО ПОТОКУ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТРАНСПОРТУВАННЯ ГАЗУ

Я.В. Грудз

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42157,
e-mail: public@nung.edu.ua

Розглядаються питання впливу ступеня нестационарности газового потока на энерговитратность трубопроводного транспортирования газа. Создано математическую модель нестационарного процесса в газопроводе, вызванного появлением шляхового отбора газа; методом интегральных преобразований получено аналитическое решение, что позволило провести расчеты критерия нестационарности и коэффициента полезного действия для гипотетического газопровода. Анализ результатов моделирования показал, что применение линеаризованных математических моделей позволяет с достаточной точностью прогнозировать процесс в широком диапазоне изменения критерия нестационарности. Построены зависимости ККД газопровода от критерия нестационарности газового потока позволили оценить меру увеличения затрат энергии на транспортирование в порівнянні з квазістационарним режимом.

Ключові слова: газопровід, нестационарний режим, енерговитрати

Рассматриваются вопросы влияния степени нестационарности газового потока на расходы энергии трубопроводного транспорта газа. Создана математическая модель нестационарного процесса в газопроводе, вызванного появлением путевого отбора газа; методом интегральных преобразований получено аналитическое решение, что позволило провести расчеты критерия нестационарности и коэффициента полезного действия для гипотетического газопровода. Анализ результатов моделирования показал, что применение линеаризованных математических моделей позволяет с достаточной точностью прогнозировать процесс в широком диапазоне изменения критерия нестационарности. Построенная зависимость коэффициента полезного действия газопровода от критерия нестационарности газового потока позволила оценить меру увеличения расхода энергии на транспортировку по сравнению со стационарным режимом.

Ключевые слова: газопровод, нестационарный режим, расход энергии

The questions of influence of degree of not stationarity of gas stream are examined on the charges of energy of pipeline transport of gas. The mathematical model of transient is created in a gas pipeline, шляхового gas extraction caused appearance, the method of integral transformations is get an analytical decision, that allowed to conduct the calculations of criterion of not stationarity and output-input ratio for a hypothetical gas pipeline. The analysis of design results rotined that application of the linearized mathematical models allowed with sufficient exactness to forecast a process in a wide turn-down criterion of not stationarity. Dependences of output-input of gas pipeline ratio are built on the criterion of not stationarity of gas stream allowed to estimate the measure of increase of charges of energy on transporting as compared to the stationary mode.

Key words: gas pipeline, non-stationare mode, expense of energy

Нестационарний характер руху газу в газопроводі викликається дією інерційних сил в газовому потоці, викликаних нештатними ситуаціями або зміною технології транспортування. Кожна з технологічних змін чи зовнішнє збурення призводить до виникнення нестационарного процесу, характерного тільки для конкретної ситуації. Однак, попри велику кількість різних нештатних ситуацій, що викликають нестационарність газового потоку, простежуються певні закономірності. Так, робота сил інерції

викликає зростання витрати енергії в порівнянні з квазістационарним потоком. Тому практичний інтерес має закономірність зростання витрати енергії в залежності від ступеня нестационарності газового потоку.

Дослідженням нестационарних процесів у газопроводах присвячено праці відомих вчених Бобровського С.А. [1], Грудза В.Я., Тимківа Д.Ф. [2], Щербакова С.А. [3], в яких наведено математичні моделі нестационарних режимів, методи їх реалізації, аналіз технологічних

обмежень. Відомі також роботи Поршакова Б.П. [4], Яковлева Є.І. [5], в яких аналізується коефіцієнт корисної дії елементів газотранспортної системи та затрати енергії на транспортування газу. Однак, в літературі відсутні дослідження взаємозв'язку між енерговитратами на транспортування газу та характеристикою режиму експлуатації.

З множини нештатних ситуацій, що призводять до виникнення нестационарності газового потоку в трубопроводі, для розгляду вибрано виникнення шляхового витoku газу. Такий підхід вибрано тому, що, змінюючи величину і місце витoku, можна досягти різного ступеня нестационарності.

Як відомо, нестационарний процес руху газу в лінійній ділянці газопроводу описується рівнянням

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{\lambda \rho w^2}{2d}, \quad (1)$$

де P – тиск газу;
 ρ – густина газу;
 w – лінійна швидкість;
 d – внутрішній діаметр труби;
 x – лінійна координата.

Якщо на ділянці $(x_1; x_2)$ магістралі має місце шляховий відбір газу з масовою витратою q , то рівняння нерозривності газового потоку може бути записане у вигляді

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -c^2 \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} \mp \frac{q}{F} \frac{\sigma(x-x_1) - \sigma(x-x_2)}{x_1 - x_2}, \quad (2)$$

де c – швидкість звуку в газі;
 F – площа перерізу труби;
 t – час;
 $\sigma(x-x_1)$ – одинична функція Хевісайда.

Рівняння руху в формі (1) і рівняння нерозривності в формі (2) шляхом сумісного розв'язку можна звести до одного рівняння, яке в математичній фізиці відноситься до класу неоднорідних рівнянь теплопровідності

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{2a}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} \mp \frac{2aq}{F} \frac{\sigma(x-x_1) - \sigma(x-x_2)}{\Delta x}, \quad (3)$$

де $\Delta x = (x_1 - x_2)$.

Тепер для отримання диференційного рівняння газопроводу із зосередженим відбором газу в точці x_1 достатньо в (2) перейти до границі $x_2 \rightarrow x_1$, тобто $\Delta x \rightarrow 0$.

Як відомо,

$$\lim[\sigma(x-x_1) - \sigma(x-x_2)] / \Delta x = \delta(x-x_1),$$

де $\delta(x-x_1)$ – функцією джерела Дірака.

Тепер рівняння (3) має вигляд

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{2a}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} \mp \frac{2aq}{F} \delta(x-x_1). \quad (4)$$

Рівняння (4) записане без інерційної складової втрат енергії. В загальному випадку система матиме вигляд

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\lambda w}{2d} \rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \rho g \frac{\partial z}{\partial x} + \rho x \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{w^2}{2} \right) = 0,$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -c^2 \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} \mp \frac{q}{F} \delta(x-x_1). \quad (5)$$

Врахувавши дію інерційних сил в потоці газу, отримаємо рівняння, яке в математичній фізиці отримало назву неоднорідного телеграфного рівняння.

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{2a}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \frac{2aq}{F} \delta(x-x_1). \quad (6)$$

Дане рівняння можна вважати найбільш узагальненою моделлю газопроводу низького тиску з шляховим відбором.

В роботах [3, 5] подано результати досліджень режимів роботи газопроводів з шляховими відборами, і показано, що для моделювання нестационарного ізотермічного процесу, викликаного нерівномірністю газоспоживання, точність визначення діагностичної ознаки не виходить за межі 5% у випадку лінеаризації рівняння руху. З цією метою вводиться поняття осередненої в часі лінійної швидкості \bar{w} , яка входить до виразу коефіцієнта лінеаризації $2a = \lambda \bar{w} / 2d$. Тож для визначення розподілу тисків скористаємося рівнянням (6). Дане рівняння може бути покладене в основу створення діагностичної моделі розгалуженої газової мережі, в якій діагностичною ознакою слід вважати коефіцієнт лінеаризації $2a$.

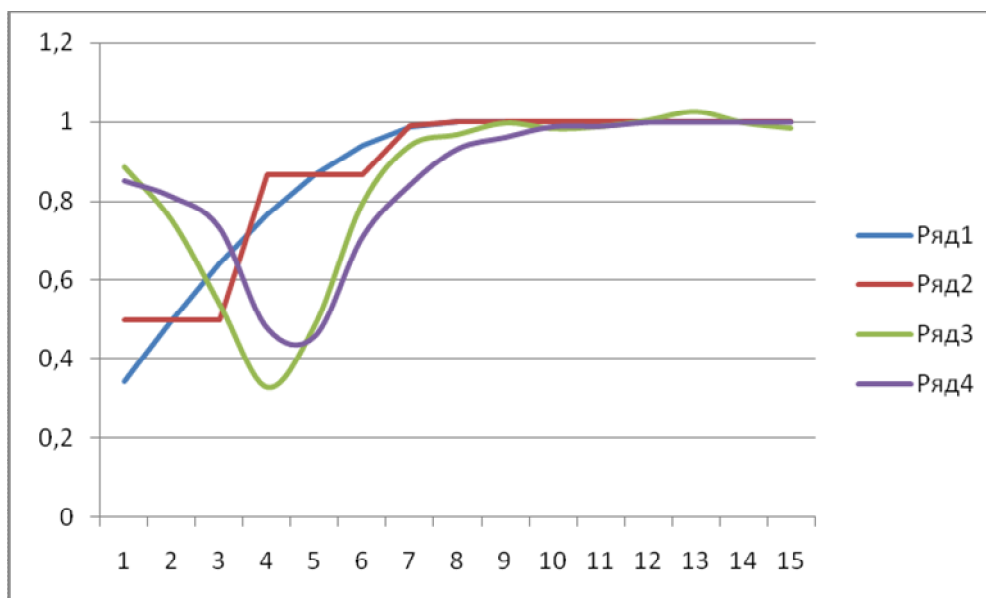
Доповнюють рівняння (6) початкові та граничні умови. Для довільного нестационарного процесу як початкові умови можуть бути використані параметри стаціонарного режиму системи як передісторія

$$P(x,0) = P_H - \frac{P_H - P_K}{L} x; \quad (7)$$

$$M(x,0) = M_0 = const.$$

Як граничні умови використовуються значення тиску на початку газової мережі $P(0,t) = P_H$ та тиску в її кінці $P(L,t) = P_K$. На практиці початковий тиск, як правило, підтримується сталим, однак витрата в кінці магістралі є переважно величиною змінною в часі. Внаслідок цього модель (6) не має розв'язку в аналітичній формі. Можлива реалізація поставленої задачі числовими методами, серед яких найбільш ефективним кінцево-різницевої. Однак задачі параметричного діагностування систем газопостачання відносяться до класу обернених задач, для яких кінцево-різницевої методи характеризуються нестійкістю і вимагають значних затрат часу на реалізацію. Так, для реальної газової мережі, що містить 24 шляхових відбори, час реалізації загальної діагностичної моделі, побудованої на основі кінцево-різницевої схеми, складає понад 2 години і залежить від характеру вихідних даних. Тому така модель не може задовольнити практичним вимогам.

Реалізація моделі (6) в аналітичному виді дозволить суттєво скоротити час реалізації, од-



1 – крива газоспоживання; 2 – кусково-постійна апроксимація кривої газоспоживання;
 3 – відносна витрата газу на початку ділянки при заданій функції газоспоживання;
 4 – відносна витрата газу на початку ділянки при кусково-постійній апроксимації

Рисунок 1 – Реалізація математичної моделі

нак при цьому втрачається точність одержаних результатів. Щоб отримати модель в аналітичному вигляді, необхідно забезпечити постійність граничних умов. Якщо ця вимога до початкової умови повністю виправдана, то для кінцевого перерізу таке припущення недопустиме, оскільки витрата газу в кінці ділянки газопроводу змінюється в широких межах. Тому приймається рішення про апроксимацію реального графіка газоспоживання кусково-сталого (ступінчастою) функцією. Варіація кроку сталості в часі для такої функції дозволить наблизити її до реального графіка газоспоживання з якою завгодно наперед заданою точністю, з одного боку, і суттєво скоротити час на реалізацію моделі з одержанням розв'язку в аналітичній формі, з іншого.

Щоб оцінити точність спрощеної (лінеаризованої) моделі проведено розрахунок газової мережі з одним відводом для початкових умов у вигляді (7) та граничних умов, що виражають сталість тиску на початку системи і реальний графік газоспоживання в її кінці. Розрахунки проводились для двох варіантів. В першому варіанті графік газоспоживання апроксимувався неперервною гладкою функцією часу, а для реалізації використовувалась загальна модель, побудована за кінцево-різницевою схемою. В другому варіанті використовувалась апроксимація графіка газоспоживання кусково-сталого функцією, і для реалізації моделі використовувалась аналітичний розв'язок задачі.

За результати досліджень для діагностування гідравлічного стану газових мереж можна рекомендувати лінеаризовані математичні моделі, які характеризуються задовільною точністю і високою швидкістю.

З метою аналітичного опису режиму роботи газопроводу у випадку появи аварійного витoku з трубопроводу розглянемо ділянку трубопроводу довжиною L і діаметром d , в точці x_1 якої має місце аварійний виток з масовою витратою q , яку вважатимемо сталою в часі. Зв'язок між зміною тиску $P(x, t)$ та масовою витратою $Q(x, t)$ в магістралі за наявності шляхового витoku продукту визначається системою рівнянь (5).

Нехай до появи аварійного витoku трубопровід працював в умовах стаціонарного руху середовища, і розподіл тисків по довжині визначався рівнянням

$$P(x,0) = P_H - \frac{P_H - P_K}{L} x \quad (8)$$

В момент виникнення аварійного витoku тиск на початку трубопроводу змінився до величини $P(0,t) = P_1$, а в кінці – $P(L,t) = P_2$. Тоді математична постановка задачі може бути сформульована у вигляді: знайти розв'язок рівняння

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{2a}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \frac{2aq}{F} \delta(x - x_1) \quad (9)$$

при початкових умовах(8) і граничних умовах

$$P(0,t) = P_1, P(L,t) = P_2 \quad (10)$$

Розв'язок шукаємо методом інтегральних перетворень. Використаємо синус-перетворення Фур'є

$$P_s = \frac{2}{L} \int_0^L P(x,t) \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) dx \quad (11)$$

Після нескладних алгебраїчних і тригонометричних перетворень отримуємо розв'язок задачі у вигляді

$$\begin{aligned}
 P(x,t) = & \left(1 - \frac{x}{L}\right) \sum_{n=1}^{\infty} [P_1 - P_2(-1)^n] + \\
 & + \frac{qL}{c^2} \left\{ \begin{aligned} & \frac{x(L-l_a)}{L^2} \text{ при } x \leq l_a, \\ & \frac{l_a(L-l_a)}{L^2} \text{ при } x > l_a \end{aligned} \right\} + \frac{2}{c^2} \left(1 - \frac{x}{L}\right) e^{-at} \times \\
 & \times \sum_{n=1}^{\infty} [(P_H - P_1) - (P_K - P_2)(-1)^n] \times \\
 & \times \frac{1}{\omega_n} (\sin \omega_n t + \cos \omega_n t) - \frac{qL}{\pi c^2} e^{-at} \times \\
 & \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n\omega_n} \sin \frac{\pi n x}{L} [\cos(\omega_n t + \varphi) - \cos(\omega_n t - \varphi)] \times \\
 & \times [\sin(\omega_n t + \varphi) - \sin(\omega_n t - \varphi)].
 \end{aligned} \tag{12}$$

За одержаним розв'язком можна визначити тиск в кожній точці трубопроводу в умовах нестационарного режиму, викликаного зміною тисків на початку і в кінці ділянки та появою зосередженого витоку газу.

Реалізація математичної моделі у формі (12) здійснювалася методом ітерацій з порівнянням кожного наступного члена безмежного ряду з попереднім за умови абсолютної різниці між ними не менше 10^{-6} . Якщо абсолютне значення різниці ставало меншим зазначеної величини, то всі наступні члени ряду відкидалися, і ітераційна процедура вважалася завершеною.

Розрахунки, проведені для різних умов на основі (12), дозволили побудувати графіки коливного процесу в газопроводі, викликаного стрибком тисків на початку і в кінці ділянки та появою шляхового відбору у визначеній точці траси. Графіки зображено на рисунку 2.

Аналіз графіків свідчить, що коливання тиску в газопроводі мають згасаючий характер. Якщо в (12) прийняти $q = 0$, то одержимо нестационарний процес, викликаний стрибкоподібною зміною тисків на початку і в кінці ділянки газопроводу, який характеризується певною частотою і декрементом згасання.

Поява витоку газу з газопроводу вносить корективи в характер протікання нестационарного процесу, які характеризуються зміною амплітуди, частоти коливань та зміщення фази процесу.

В процесі числового моделювання розглядалися варіанти розміщення витоку з масовою витратою 0,5% від витрати газу по магістралі, причому витік розміщався на віддалі 20% від початку і кінця ділянки. В обидвох варіантах витік газу включався на 70 секунд від початку нестационарного процесу, викликаного стрибкоподібною зміною тисків на початку і в кінці ділянки. Для варіанту розміщення витоку на віддалі 20% від початку ділянки характерне зменшення частоти коливного процесу і зростання амплітуди коливань. Крім того, в момент часу, що відповідає появі витоку, спостерігається зміщення характеристики процесу по

фазі. Для варіанту розміщення витоку газу на відстані 89% від початку ділянки газопроводу характерне зростання частоти коливного процесу і зростання амплітуди коливань, але значно меншою мірою, ніж в першому варіанті. В момент часу, що відповідає появі витоку, спостерігається зміщення характеристики процесу по фазі, причому значно суттєвіше, ніж в першому варіанті.

З одержаного розв'язку видно, що за наявності аварійного витоку з трубопроводу повинен змінитися тиск в кожній точці. Однак, якщо витік q досить малий, то він впливає на загальний розподіл тисків у межах похибки вимірювання, отже зафіксувати зміну параметрів неможливо.

Якщо в одержаному розв'язку прийняти $q = 0$, то власна частота коливань в трубопроводі становитиме

$$\omega_n = \frac{1}{2L} \sqrt{(2\pi n c)^2 - \left(\frac{\lambda W}{4d} L\right)^2}.$$

При виникненні аварійного витоку ($q \neq 0$) власна частота коливань середовища зміщується за фазою на величину $\varphi = \frac{\pi n x_1}{L}$.

Як відомо, оцінка міри нестационарності газового потоку в газопроводі може бути дана, виходячи з числового значення критерію нестационарності [1].

Технологічний режим роботи газопроводу вважається квазістационарним у тому випадку, якщо величина критерію нестационарності складає $N_i < 1,4 \cdot 10^{-6}$. В іншому випадку режим руху газу вважається нестационарним і зі зростанням величини критерію нестационарності ступінь нестационарності потоку (тобто ступінь впливу інерційних сил) збільшується.

За даними аналітичних досліджень нестационарного руху газу в гіпотетичному газопроводі обчислено критерій нестационарності за методикою [1]. При цьому, якщо в (12) прийняти, що час прямує до безмежності, то отримаємо характеристику стаціонарного режиму роботи газопроводу, для якого критерій нестационарності рівний нулю.

Для кожного з режимів розраховувалося значення ККД газопроводу, при цьому враховувалася дія виключно сил інерції в потоці. Очевидно, що максимальне значення ККД η_0 відповідає нульовому значенню критерію нестационарності потоку. Тоді кожен нестационарний режим оцінювався відносною величиною

$$\text{ККД } \bar{\eta} = \frac{\eta}{\eta_0}.$$

У такий спосіб побудовано залежність величини відносного ККД газопроводу від критерію нестационарності, яка у вигляді графіка приведена на рисунку 3.

Із графіка видно, що при квазістационарних режимах течії газового потоку в трубах ($N_i < 1,4 \cdot 10^{-6}$) інерційні сили виконують незначний обсяг роботи, що зумовлює зниження відносного ККД газопроводу до 2%. Зростання

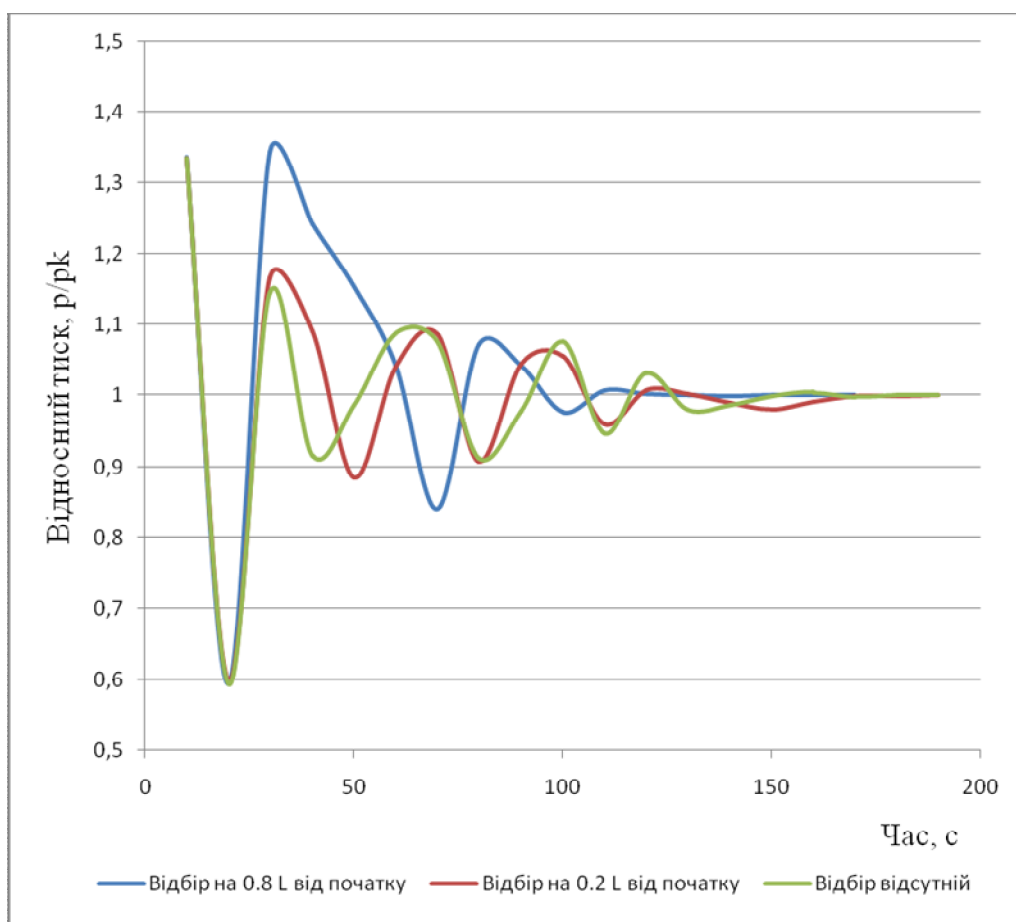


Рисунок 2 – Характер коливання тиску в газопроводі

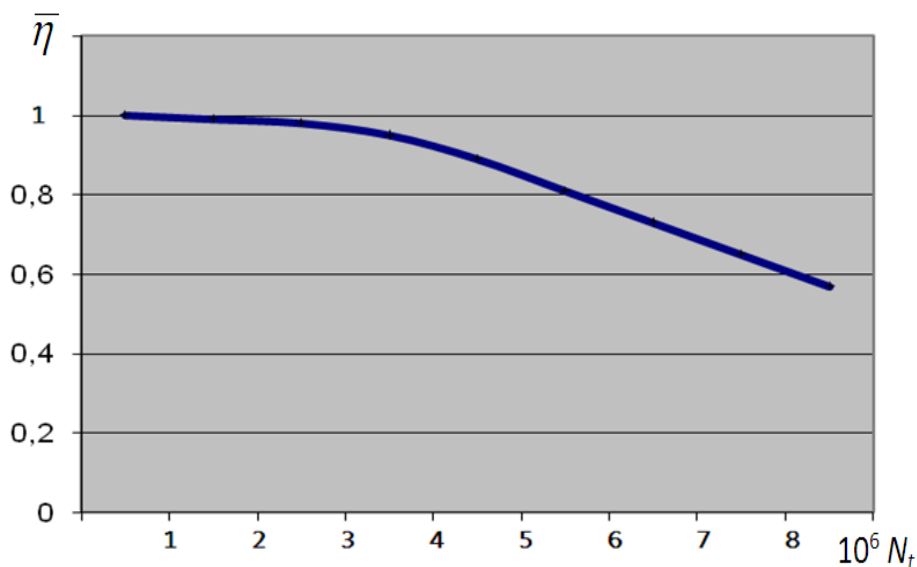


Рисунок 3 – Залежність ККД газопроводу від критерію нестационарності

критерію нестационарності викликає збільшення обсягу роботи сил інерції в газовому потоці, що призводить до зниження величини відносного ККД газопроводу. Так, при значенні критерія нестационарності $N_t = 2,0 \cdot 10^{-6}$ величина відносного ККД зменшується на 19%, а з досягненням значення критерію нестационарності $N_t = 2,6 \cdot 10^{-6}$ зниження відносного ККД досягає

43%. На практиці режими експлуатації газопроводів із такими великими значеннями критерію нестационарності зустрічаються рідко. Проте, слід мати на увазі, що інерційні сили в газовому потоці можуть призвести до суттєвого зниження ККД газопроводу, тому експлуатація газопроводів найбільш ефективна при стаціонарних та квазістаціонарних режимах.

Література

- 1 Бобровский С.А. Движение газа в газопроводе с пусковым отбором / С.А. Бобровский, С.Г. Щербаков, М.А. Гусейнзаде. – М.: Недра, 1972. – 193 с.
- 2 Ковалко М.П. Трубопровідний транспорт газу / [М.П. Ковалко, В.Я. Грудз, В.Б. Михалків та ін.]. – К.: АренаЕКО, 2002. – 600 с.
- 3 Щербаков С. Г. Проблемы трубопроводного транспорта нефти и газа / Щербаков С. Г. – М.: Наука, 1982. – 206 с.
- 4 Поршаков Б.П. Газотурбинные установки для магистральных газопроводов / Б.П. Поршаков, В.И. Халатин. – М.: Недра, 1974. – 221 с.
- 5 Яковлев Е.И. Анализ неустановившихся процессов в нитках магистрального газопровода статистическими методами / Е.И. Яковлев Изв. вузов Нефть и газ. – 1968. №2.– С.72-76.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
03.10.12
Рекомендована до друку професором
Д.Ф. Тимківим*