

Дослідження нестационарного руху газу в трубопроводі з урахуванням градієнта густини та витрати маси

Ярослав П'янило

д. т. н., Центр математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Дудасва, 15, Львів, 79005, e-mail: pfrom@cmmm.lviv.ua

Розглянуто модель нестационарного руху газу в трубопроводі з урахуванням нелінійних ефектів, градієнта масової витрати та густини газу за просторовою і часовою координатами. Отримано наближені розв'язки сформульованих задач математичної фізики. Під час проведення числового експерименту на реальних даних показано, що залежно від початково-крайових умов, градієнт густини газу може суттєво впливати на газодинамічні параметри. Тому його необхідно враховувати у тих випадках, коли для обчислення параметрів процесу використовують значення не функцій, а їх похідних.

Ключові слова: моделювання фізичних процесів, нестационарні нелінійні задачі математичної фізики, обчислювальний експеримент.

Вступ. У процесі експлуатації магістральних газопроводів взаємодія різних збурень викликає неусталений рух газу, що супроводжується коливаннями тиску та масової (об'ємної) витрати вздовж трубопроводу, які слід враховувати в оперативному диспетчерському управлінні потоками газу. Основними причинами виникнення неусталеного руху газу є його нерівномірне споживання, зміна величини транзитних потоків, під'єднання чи від'єднання окремих споживачів і т. п. Знання особливостей неусталеного руху газу й уміння розраховувати його газодинамічні параметри дозволяє уникати аварійні ситуації, обґрунтовувати швидкість реакції систем автоматичного управління та захисту, вибирати найпридатнішу систему автоматичного регулювання та систему захисту від надлишкових тисків чи їх швидких змін.

При математичному моделюванні неусталених режимів опис фізичних процесів спрощується та враховуються найсуттєвіші фактори.

Для опису руху газу в трубопроводі в нестационарному неізотермічному режимі побудовано значну кількість взаємозв'язаних систем диференціальних рівнянь у частинних похідних [1-4]. Однією з них є наступна

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(p + \frac{\omega^2}{\rho} \right) &= - \left(\frac{\lambda \omega |\omega|}{2\rho D} + \rho g \frac{dh}{dx} \right), & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \omega}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\omega \left(E + \frac{p}{\rho} \right) \right] &= \frac{4k(T_{sp} - T)}{D} - \omega g \frac{dh}{dx}, \end{aligned} \quad (1)$$

де ω — масова витрата газу, ρ, v, p — густина, швидкість руху та тиск газу відповідно; λ — коефіцієнт гідравлічного опору; D — діаметр трубопроводу; g — прискорення вільного падіння; h — відносна висота залягання трубопроводу; k — коефіцієнт теплопередачі від трубопроводу до ґрунту; T_{gp} — температура ґрунту; T — температура газу; $t > 0$ — час; $x \in [0, l]$ — лінійна координата, l — довжина трубопроводу; E — повна енергія одиниці маси газу, $C_p = \rho(\partial i / \partial T)$, $i = i(T, p)$ — внутрішня енергія. Для замикання системи рівнянь необхідно врахувати співвідношення між тиском і густиною газу (рівняння стану)

$$p = \rho \chi RT. \quad (2)$$

Тут χ — коефіцієнт стисливості, який характеризує відмінність ідеального газу від реального, R — газова стала. Для обчислення коефіцієнта стисливості часто використовують емпіричний вираз [1, 2]

$$\chi = \frac{1}{1 + f p},$$

де $f = (24 - 0,21T_s)0,101302 \cdot 10^{-9}$, а T_s — температура газу за шкалою Цельсія.

Вихідна система диференціальних рівнянь у частинних похідних є нелінійна з розподіленими параметрами. Для її розв'язування використовують, в основному, числові методи [3, 5]. Оскільки при моделюванні процесу руху газу вхідна інформація, яка необхідна для формування крайових умов, відома в дискретному вигляді з невисокою точністю, то виникають суттєві проблеми під час практичних обчислень [4-6]. Окрім цього, неоднорідність оточуючого середовища, в якому перебувають трубопроводи, як правило, є невизначена. Це приводить до мало-ефективного використання рівняння балансу енергії. Практика свідчить, що під час дослідження нестационарного неізотермічного процесу руху газу, в більшості випадків, можна обмежитися рівняннями руху та балансу маси. При цьому враховують залежність коефіцієнтів задачі від температури. Тому для дослідження нестационарного руху газу найчастіше використовують таку систему взаємозв'язаних диференціальних рівнянь у частинних похідних

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \rho \alpha \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\omega^2}{2\rho^2} \right) + \rho g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\lambda \omega^2}{2\rho D} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \quad (3)$$

де $c = \sqrt{k\chi RT}$ — швидкість звуку в газі, k — коефіцієнт теплопередачі від газу до ґрунту, α — коефіцієнт Коріоліса (для ламінарного потоку $\alpha = 2$, а для турбулентного — $\alpha = 1,1$). У першому рівнянні враховано сили тертя, різниці перепаду висот трубопроводу й інерційний опір. Друге рівняння характеризує кількісний баланс газу.

Якщо у системі рівнянь (3) врахувати, що $\omega = \rho v$, і у першому рівнянні знехтувати доданком $v \partial \rho / \partial t$, то вона набуде вигляду

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \rho \alpha \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v^2}{2} \right) + \rho \frac{\lambda v^2}{2D} + \rho g \frac{\partial h}{\partial x} + \rho \frac{\partial v}{\partial t} = 0,$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} = 0. \quad (4)$$

Зауважимо, що при побудові рівняння руху на основі принципу Даламбера [3] інерційний опір визначається доданком $\rho \partial v / \partial t$. Для обчислення параметрів, що входять у системи (3) або (4), на основі експериментальних даних побудовано значну кількість емпіричних формул. Зокрема, для коефіцієнта гідравлічного опору λ [1, 2]

$$\lambda = \left(\frac{Y + \varepsilon + \Theta^{1.5}}{1 + 76\Theta} \right)^{0.2},$$

де $Re = \frac{D v \rho}{\mu_0 R T} \frac{T + C}{273 + C} \left(\frac{273}{T} \right)^{3/2}$ — число Рейнольдса, $\varepsilon = k_{ш} / D$, $Y = 79 / Re$, $\Theta = (2Y)^{10}$,

$k_{ш}$ — коефіцієнт шорсткості трубопроводу, μ_0 — динамічна в'язкість газу в стандартних умовах ($p_A = 0,1033$ МПа, $T_A = 293$ К), C — стала Сатерланда.

Для розрахунку зміни температури газу вздовж трубопроводу використовують формулу [6]

$$T(x) = T_{01} + T_{02} e^{-ax},$$

де

$$T_{01} = T_{zp} - T_{00}, \quad T_{02} = T_0 - T_{zp} + T_{00},$$

$$T_{00} = \frac{1}{al} \left[\Delta p \left(D_i - \frac{1}{C_p \rho_0} \right) + \frac{g \Delta h}{C_p} \right], \quad \Delta p = p_0 - p_l, \quad a = \frac{k \pi D}{C_p \omega},$$

T_0 — температура газу на вході в трубопровід, C_p — теплоємність газу при сталому тиску, p_0 і p_l — значення тисків на початку та в кінці трубопроводу, D_i — коефіцієнт Джоуля-Томпсона, ρ_0 — густина газу в стандартних умовах.

Слід зауважити, що в цьому випадку під час обчислення температури поряд з ефектом Джоуля-Томпсона, який приводить до зниження температури, враховано і її підвищення за рахунок сил тертя. До того ж прояв сил тертя переважає вплив ефекту Джоуля-Томпсона.

Метою цієї роботи є дослідження процесу руху газу в трубопроводі на основі нелінійних нестационарних моделей, що базуються на рівняннях балансу імпульсу та законі збереження маси. Вивчається також вплив градієнта масової витрати та густини газу на газодинамічні параметри руху.

Зауважимо, що під час розрахунку параметрів руху газу в стаціонарному випадку приймаємо масову витрату за координатою сталою, а під час дослідження нестационарних процесів — постійність масової витрати за часом. При цьому градієнт зміни густини газу може мати значний вплив на інші газодинамічні параметри.

1. Постановка задачі

Розглядаємо горизонтальний трубопровід ($h(x) = 0$) і не враховуємо зміну кінетиної енергії газу ($\alpha = 0$). За початковий стан вибираємо вихідний стаціонарний стан, за якого розподіл тиску $p_s(x)$ вздовж трубопроводу задано формулою

$$p_s(x) = \sqrt{p_0^2 - \frac{\lambda \chi R T}{D} \left(\frac{\rho_0 Q_0}{F} \right)^2} x, \quad (5)$$

де $F = \pi D^2 / 4$ — площа поперечного перерізу трубопроводу, Q_0 — об'ємна витрата газу в стандартних умовах. Аналіз заміряних даних тиску та витрати газу на початку $p(0, t)$ та в кінці $p(l, t)$ трубопроводу показує, що граничні умови з достатньою для практики точністю можна апроксимувати експоненціальними функціями виду

$$p(0, t) = p_0 + p_{00} (1 - e^{-\beta_0 t}), \quad (6)$$

$$p(l, t) = p_l + p_{ll} (1 - e^{-\beta_l t}). \quad (7)$$

Оскільки початкові та граничні умови є узгоджені, то параметри p_{00} і p_{ll} визначають граничну зміну тиску на початку й у кінці трубопроводу за перехідний період, а β_0 і β_l характеризують швидкість виходу граничних умов на усталений режим.

Зауважимо, що в практиці для оцінки роботи газотранспортної системи використовують не розподіли газодинамічних параметрів уздовж трубопроводу, а їхні значення на початку й у кінці останнього. Оскільки граничні умови задано на функцію тиску, то шуканими величинами є масова витрата для системи (3) та швидкість — для системи (4).

Тому задачу формулюємо так: знайти масові витрати газу на кінцях трубопроводу та дослідити вплив на них градієнта густини газу, градієнта масової витрати за часом і початково-граничних умов.

2. Розв'язок задачі

За вибраних вище початково-граничних умов наближений розв'язок системи (3) на послідовному j -му часовому зрізі визначається наступним чином

$$\omega(l, t) = \frac{1}{2y_1} \left(\sqrt{y_2^2 - 4y_1 y_3} - y_2 \right), \quad \omega(0, t) = y_4 + \omega(l, t), \quad (8)$$

де

$$y_1 = \frac{\Delta t}{2} (\eta_{22} + \eta_{12}), \quad y_2 = \Delta t \eta_{12} \left[\frac{l}{c_s^2 \Delta t} (p_{22} + p_{12} - p_{21} - p_{11}) + \omega_{21} - \omega_{11} \right] + 2\gamma,$$

$$y_3 = \frac{\Delta t}{l} (p_{22} - p_{12} + p_{21} - p_{11}) + \frac{\Delta t}{2} (\theta_{21} + \theta_{11}) - \gamma (\omega_{21} + \omega_{11}) +$$

$$+ \gamma \left[\frac{l}{c_s^2 \Delta t} (p_{22} + p_{12} - p_{21} - p_{11}) + \omega_{21} - \omega_{11} \right] +$$

$$\begin{aligned}
 & +\eta_{12} \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{l}{c_s^2 \Delta t} (p_{22} + p_{12} - p_{21} - p_{11}) + \omega_{21} - \omega_{11} \right]^2, \\
 y_4 &= \frac{l}{c_s^2 \Delta t} (p_{22} + p_{12} - p_{21} - p_{11}) + \omega_{21} - \omega_{11}, \\
 \eta(x, t) &= \frac{\lambda z R T}{2 D p}, \quad \theta(x, t) = \eta(x, t) \omega(x, t), \\
 p_{11} &= p(0, t_{j-1}), \quad p_{12} = p(0, t_{j-1} + \Delta t), \quad p_{21} = p(l, t_{j-1}), \quad p_{22} = p(l, t_{j-1} + \Delta t), \\
 \omega_{11} &= \omega(0, t_{j-1}), \quad \omega_{12} = \omega(0, t_{j-1} + \Delta t), \quad \omega_{21} = \omega(l, t_{j-1}), \quad \omega_{22} = \omega(l, t_{j-1} + \Delta t), \\
 \eta_{11} &= \eta(0, t_{j-1}), \quad \eta_{21} = \eta(l, t_{j-1}), \quad \eta_{12} = \eta(0, t_{j-1} + \Delta t), \quad \eta_{22} = \eta(l, t_{j-1} + \Delta t).
 \end{aligned}$$

Тут Δt — крок за часом, c_s — середнє значення швидкості звуку в газі; якщо в системі (3) не враховується залежність масової витрати ω від часу, то $\gamma = 0$, у протилежному випадку — $\gamma = 1$. Зміст параметрів θ_{ij} , $i, j = 1, 2$, визначається виглядом функції $\theta(x, t)$.

Розв'язок системи (3) у вигляді (8) отримано шляхом інтегрування рівнянь, що входять у систему, за координатою (від початку до кінця трубопроводу) та часом (від t_{j-1} до $t_j = t_{j-1} + \Delta t$, $j = 1, 2, \dots$) за використання теореми про середнє.

За крайових умов (5)-(7) розв'язок системи (4) буде

$$v(0, t) = \frac{1}{2(1 + \eta_1^2)} \left[\sqrt{\eta_2^2 (1 + \eta_1^2) - 4(1 + \eta_1^2) \eta_3} - \eta_2 (1 + \eta_1) \right], \quad v(l, t) = \eta_1 v_{12}. \quad (9)$$

Тут

$$\begin{aligned}
 \eta_1 &= \frac{z_{22} T_{22} z_{21} T_{21}}{z_{12} T_{12} z_{11} T_{11}} \frac{v_{11}}{v_{21}} \frac{p_{12} p_{11}}{p_{22} p_{21}} \left(\frac{p_{22} p_{12}}{p_{21} p_{11}} \right)^{-l/kv_s \Delta t}, \quad \eta_2 = \frac{4D}{\lambda \Delta t}, \\
 \eta_3 &= \frac{4D}{\lambda l} \left[z_s R_s T_s \ln \frac{p_{22} p_{21}}{p_{12} p_{11}} + \frac{\lambda l}{4D} (v_{21}^2 + v_{11}^2) - \frac{l}{\Delta t} (v_{21} + v_{11}) \right].
 \end{aligned}$$

У цих формулах індекси мають такий же зміст, що й у попередньому випадку, а індекс s означає середнє значення відповідної величини. Зауважимо також, що використані позначення орієнтовані на літературні джерела, в яких досліджуються газотранспортні мережі.

Проведено розрахунок горизонтального трубопроводу з такими параметрами: початковий тиск $p_0 = 66,8$ атм, об'ємна витрата $q_0 = 3,516 \cdot 10^6$ м³/год; вхідна температура газу 40° С; коефіцієнт тепловіддачі від газу до ґрунту $k = 1,3$; газова стала $R = 490$ (Дж/кг·К); $C_p = 2200$ (Дж/кг·К); стала Сазерленда — 164; коефіцієнт шорсткості — 0,0366 мм; довжина трубопроводу $l = 1,22 \cdot 10^5$ м; діаметр — 1,388 м. На рис. 1, 2 крива 1 відповідає масовій витраті газу у вихідному стаціонарному стані; крива 2 — масовій витраті на початку трубопроводу, обчисленій на основі моделі (3) за нестационарного режиму руху газу, крива 4 — на основі моделі (4) при $\gamma = 1$ (рис. 1)

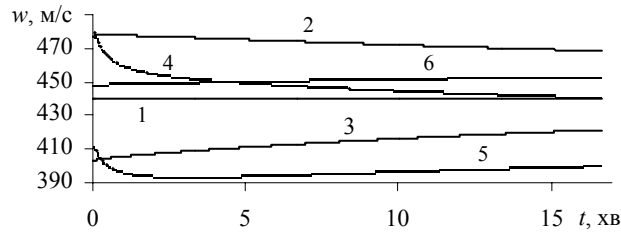


Рис. 1. Розподіл масової витрати від часу (в хвилинах), обчислений на основі моделей (1) та (3) з урахуванням градієнта масової витрати за часом у рівнянні руху

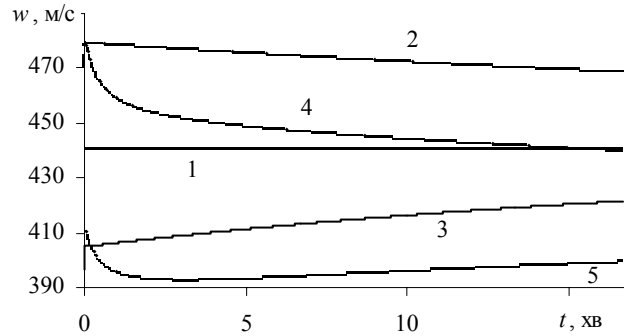


Рис. 2. Динаміка зміни масових витрат, обчислених на основі моделей (3) і (4) та нехтуванням у рівнянні руху градієнтом масової витрати

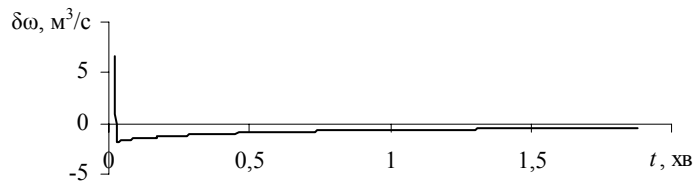


Рис. 3. Залежність від часу абсолютної похибки $\delta\omega$, яка виникає внаслідок нехтування у рівнянні руху градієнтом масової витрати

та $\gamma = 0$ (рис. 2); крива 3 — масовій витраті в кінці трубопроводу, обчислений на основі моделі (3) за нестационарного режиму руху газу, а крива 5 — на основі моделі (4) при $\gamma = 1$ (рис. 1) і $\gamma = 0$ (рис. 2); крива 6 — масовій витраті, обчислений згідно стаціонарної моделі за заданими граничними умовами.

Використовуючи аналіз та обробку заміряних даних при включенні в роботу на компресорній станції додатково одного газоперекаючого агрегату, задамо таку граничну умову на вході трубопроводу

$$p(0, t) = p_0 + p_{00} \left[\left(\frac{\beta_0 t}{\gamma} \right)^\gamma \exp(\gamma - \beta_0 t) + 1 - e^{-\beta_0 t} \right]. \quad (10)$$

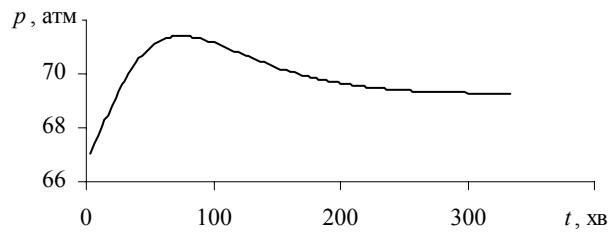


Рис. 4. Динаміка зміни тиску на початку трубопроводу, обчисленого за формулою (10)

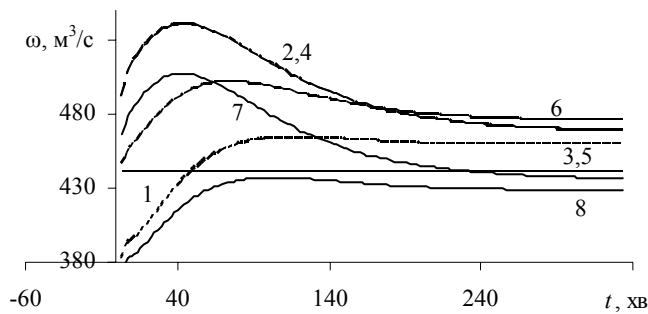


Рис. 5. Залежності масових витрат за заданої граничної умови на вході трубопроводу у вигляді (9): крива 1 — масова витрата у вихідному стаціонарному стані; криві 2, 4 — обчислені на основі моделі (3) масові витрати газу при $\gamma = 0$ (крива 2) та $\gamma = 1$ (крива 4) на початку трубопроводу за нестационарного режиму руху газу; криві 3, 5 — обчислені на основі моделі (3) масові витрати газу при $\gamma = 0$ (крива 3) та $\gamma = 1$ (крива 5) у кінці трубопроводу за нестационарного режиму руху; крива 6 — масова витрата газу, обчислена згідно стаціонарної моделі за прийнятими граничними умовами; криві 7, 8 — обчислені на основі моделі (4) масові витрати газу на початку (крива 7) та в кінці (крива 8) трубопроводу за нестационарного режиму руху

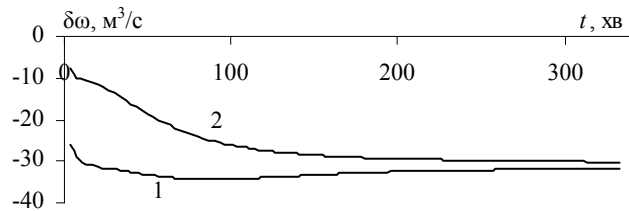


Рис. 6. Динаміка масових витрат $\delta\omega$ (m^3/c), обчислених згідно моделей (4) та (3), на основі граничних умов (6) і (10) на початку (крива 1) та в кінці (крива 2) трубопроводу

Тут параметри p_0 і p_{00} мають такий же ж зміст, що і в формулі (6), параметри β_0 і γ відповідають за перехідний час і максимум функції $p(0, t)$. Для $\gamma = 2$ та $\beta_0 = 0,005$ залежність цієї граничної умови від часу показано на рис. 4.

Таблиця 1

Швидкості руху газу у різні моменти часу, обчислені на основі моделі (3) (v_{r0} — на початку трубопроводу, v_{rl} — у кінці трубопроводу) та на основі стаціонарної моделі руху газу (v_{st0} — на початку трубопроводу, v_{stl} — у кінці трубопроводу), якщо початкові значення тиску обчислюються за формулою (9), а в кінці трубопроводу — за формулою (6)

t	v_{r0}	v_{rl}	v_{st0}	v_{stl}	$v_{r0} - v_{st0}$	$v_{rl} - v_{stl}$
10	9,73	11,36	9,53	13,20	0,20	- 1,84
20	9,83	11,64	9,65	13,55	0,18	- 1,91
30	9,87	11,95	9,75	13,87	0,12	- 1,92
40	9,85	12,22	9,83	14,12	0,02	- 1,90
50	9,80	12,44	9,88	14,30	- 0,08	- 1,86
60	9,73	12,60	9,91	14,40	- 0,18	- 1,80
70	9,65	12,70	9,93	14,44	- 0,28	- 1,74
80	9,57	12,76	9,93	14,44	- 0,36	- 1,68
90	9,49	12,79	9,92	14,41	- 0,43	- 1,62
100	9,42	12,79	9,90	14,36	- 0,48	- 1,57
110	9,35	12,78	9,88	14,29	- 0,53	- 1,51
120	9,29	12,75	9,86	14,22	- 0,57	- 1,47
130	9,24	12,72	9,84	14,15	- 0,60	- 1,43
140	9,19	12,69	9,82	14,09	- 0,63	- 1,40
150	9,15	12,66	9,80	14,03	- 0,65	- 1,37
160	9,12	12,63	9,78	13,97	- 0,66	- 1,34
170	9,09	12,60	9,77	13,92	- 0,68	- 1,32
180	9,06	12,57	9,75	13,88	- 0,69	- 1,31
190	9,04	12,55	9,74	13,84	- 0,70	- 1,29
200	9,02	12,53	9,73	13,81	- 0,71	- 1,28
210	9,00	12,52	9,72	13,78	- 0,72	- 1,26
220	8,99	12,50	9,71	13,76	- 0,72	- 1,26
230	8,98	12,49	9,71	13,74	- 0,73	- 1,25
240	8,97	12,49	9,70	13,73	- 0,73	- 1,24

Висновки. Під час моделювання нестационарного режиму руху газу в трубопроводі на основі системи (3) за вибраних початково-граничних умов залежність масової витрати від часу істотно впливає на її величину у початковий період часу. Цей період співвимірний із часом виходу на усталений режим роботи у разі включення (виключення) одного газоперекачуючого агрегата. Тому даний ефект необхідно враховувати під час розробки алгоритмів керування газопотоками.

Доданок $v\partial\rho/\partial t$ вносить суттєву різницю між газодинамічними параметрами (масовою витратою газу — рис. 1, 2, 5 і швидкістю його руху — табл. 1), знайденими згідно розв'язків систем (3) та (4). Незважаючи на те, що з часом ця різниця стабілізується, характер виходу на стаціонарний режим є різний. Це слід враховувати, якщо для розрахунку газодинамічних параметрів доводиться використовувати не значення функцій, а їхніх похідних.

Проведені дослідження показують, що вплив градієнта масової витрати за часом у вихідній системі рівнянь залежить від граничних умов (за граничних умов (10) на початку трубопроводу та (6) у кінці — значення масових витрат практично співпали).

У загальному випадку, як за стаціонарного, так і нестаціонарного режимів руху газу, масова витрата залежить від координати. Звідси випливає, що заміри масової витрати в одній точці трубопроводу не дають можливості достатньо точно ідентифікувати параметри процесу.

У літературі для аналізування перехідних режимів руху газу (зокрема, критеріїв нестаціонарності) використовують відношення значення тисків на виході та вході трубопроводу. Якщо рух газу моделюють на основі системи (4), то ці відношення входять у кінцеві результати. Оскільки швидкість руху газу визначається у процесі розв'язування системи (4), то це дозволяє без додаткових перетворень обчислювати критерії нестаціонарності, зокрема, Струхалю $Str = x/(vt)$ та Гухмана $G = v^2\lambda x/(k\chi RTD)$ [1, 3].

Література

- [1] Александров А. В., Яковлев Е. И. Проектирование и эксплуатация систем дальнего транспорта газа. — Москва: Недра, 1974. — 432 с.
- [2] Жидкова М. А. Трубопроводный транспорт газа. — Киев: Наук. думка, 1973. — 142 с.
- [3] Трубопроводный транспорт газа / Ковалко М. П., Грудз В. Я., Михалків В. Б. та ін. — Київ: Арена, 2002. — 600 с.
- [4] Кушнір Р. М., П'янило Я. Д., П'янило А. Я. Особливості застосування числового методу скінчених різниць при моделюванні фізичних процесів // Фіз.-мат. моделювання та інформаційні технології. — 2005. — Вип. 2. — С. 58-69.
- [5] Вплив зміни параметрів газу на розподіл тиску в горизонтальних трубопроводах / Михалевич О., Тимків Д., П'янило Я. та ін. // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету: Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. — 2003. — № 4(9). — С. 30-36.
- [6] Аналіз впливу гідравлічних параметрів на процес течіння газу в лінійних трубопроводах / Михалевич О., П'янило Я., Притула М. та ін. // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету. — 2004. — № 1(7). — С. 78-85.

The investigation of non-stationary motion of gas in a pipeline with account of the influence of density gradient and mass consumption

Yaroslav P'yanylo

A model of the transient motion of gas in a pipeline is considered, taking into account nonlinear effects, the gradient of mass consumption and gas density by space and time coordinates. Approximate solutions of formulated problems of mathematical physics at the end of the pipeline are obtained. It is shown that during numerical experiments with use of the real data the gradient of gas density has great influence on the gas-dynamic parameters of its motion depending on the initial boundary conditions. That is why it is necessary to take into account the gradient of gas density when the value of derivatives, not functions, are used for the process parameters calculation.

Исследование нестационарного движения газа в трубопроводе с учетом градиента плотности и расхода массы

Ярослав Пяныло

Рассмотрена модель нестационарного движения газа в трубопроводе с учетом нелинейных эффектов, градиента массового расхода и зависимости плотности газа от пространственной и временной координат. Получены приближенные решения поставленных задач математической физики. При проведении численного эксперимента на реальных данных показано, что в зависимости от начально-краевых условий, градиент плотности газа может значительно влиять на газодинамические параметры. Поэтому его необходимо учитывать в тех случаях, когда для вычисления параметров процесса используются значения не функций, а их производных.

Отримано 14.02.08