УДК 621.64.029

А. Дацюк[*], Я. П'янило, М. Притула, Н. Притула, Б. Землянський
[*]ДК "Укртрансгаз",
Центр математичного моделювання
Інституту прикладних проблем механіки і математики
ім. Я.С. Підстригача НАН України

АНАЛІЗ НЕСТАЦІОНАРНОГО ПРОЦЕСУ РУХУ ГАЗУ В ТРУБОПРОВОДІ

Побудовано наближений розв'язок нелінійної взаємозв'язаної системи диференціальних рівнянь у частинних похідних з розподіленими параметрами, яка описує рух газу в трубопроводі. На основі отриманого розв'язку досліджено вплив фізичних факторів на газодинамічні параметри руху газу (масові швидкості на початку і в кінці трубопроводу). Проаналізовано результати досліджень, отриманих під час обчислювального експерименту.

The approached decision of the nonlinear interconnected system of the differential equations in private derivatives with the distributed parameters which describes gas movement in the pipeline is built. On the basis of the received decision influence of physical factors on gasodynamic parameters of movement of gas (mass speeds in the beginning and in the end of the pipeline) is investigated. It is conducted the analysis of results of research received during computing experiment.

Вступ

У літературі описано декілька моделей нестаціонарного руху газу в трубопроводі з врахуванням різних факторів впливу на рух. Ефекти ж впливу цих факторів на розподіл газодинамічних параметрів досліджено недостатньо. Серед робіт, де вивчаються фактори впливу, можна згадати [3, 5]. Причин цього є декілька: отримані параметричні описи руху є, як правило, нелінійними системами диференціальних рівнянь в частинних похідних; не існує методів з гарантованою точністю розв'язування цих систем; немає необхідної кількості достовірних замірів для перевірки адекватності отриманих результатів тощо. Разом з тим при побудові параметричних співвідношень використовуються різного роду припущення, які в певних просторово-часових діапазонах можуть робити істотний внесок при визначенні параметрів фізичного процесу, що вивчається.

Метою роботи є дослідження впливу масової витрати, характеру руху та рельєфу траси залягання ділянки трубопроводу на параметри нестаціонарного руху газу на основі нелінійних нестаціонарних моделей, що ґрунтуються на рівняннях балансу імпульсу та законі збереження маси. Ця робота є продовженням досліджень, початих у [1].

Поширеною взаємозв'язаною системою диференціальних рівнянь у частинних похідних, якою описується рух газу в трубопроводі в нестаціонарному неізотермічному режимі, є така [1–4]

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

де $w = ru$ — масова витрата газу, ρ, υ, p — густина, швидкість руху та тиск газу відповідно; D — діаметр трубопроводу; g — прискорення вільного падіння; h — відносна висота залягання трубопроводу; k — коефіцієнт теплопередачі від трубопроводу до ґрунту; $T_{гр}$ — 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 — внутрішня енергія. Для замикання системи рівнянь задається рівняння стану

$$p = \rho z R T. \tag{2}$$

Тут $z = z(p, T)$ – коефіцієнт стисливості та $l = l\left(u, p, T, k_{ш}\right)$ ($k_{ш}$ — коефіцієнт шорсткості трубопроводу) — коефіцієнт гідравлічного опору, для обчислення яких в різних діапазонах зміни параметрів побудовано емпіричні формули різного степеня точності і достовірності, R — газова стала.

Розв'язування системи (1) вимагає задання деяких параметрів, зокрема коефіцієнта теплопередачі від газу до ґрунту, які значно змінюються за довжиною трубопроводу залежно від середовища залягання труби і є невідомими. Тому найчастіше використовують таку систему взаємозв'язаних диференціальних рівнянь у частинних похідних

$$\begin{aligned} &\frac{\partial p}{\partial x} + \rho\alpha\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\omega^2}{2\rho^2}\right) + \beta\rho g\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\lambda\omega^2}{2\rho D} + \gamma\frac{\partial \omega}{\partial t} = 0, \\ &\frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{1}{c^2}\frac{\partial p}{\partial t} = 0, \end{aligned} \tag{3}$$

де $c = \sqrt{kzRT}$ — швидкість звуку в газі, 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. При цьому зміна температури від довжини трубопроводу враховується на основі побудови ітераційного алгоритму. В системі (3) коефіцієнти β та γ введено з метою вивчення впливу відповідних складових сил і вони набувають значення 0 або 1.

Для розрахунку зміни температури газу вздовж трубопроводу використовується формула [6]

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

де

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

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

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.

Постановка задачі

Розглядається неусталений рух газу в трубопроводі з врахуванням всіх сил, що входять до рівняння руху системи (3). За початковий стан вибирається вихідний стаціонарний стан, при якому розподіл тиску $p_s(x)$ вздовж трубопроводу задається формулою

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

де $F = \pi D^2/4$ — площа поперечного перерізу трубопроводу, Q_0 — об'ємна витрата газу в стандартних умовах. Граничні умови на початку $p(0, t)$ та в кінці $p(l, t)$ трубопроводу задаються функціями вигляду

$$p(0,t) = p_0 + p_{00}\left[\left(\frac{\beta_0 t}{\gamma}\right)^{\gamma} \exp(\gamma - \beta_0 t) + 1 - e^{-\beta_0 t}\right], \tag{6}$$

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

Початкові і граничні умови приймаються узгодженими. Параметри β_0 і β_l характеризують швидкість виходу граничних умов на усталений режим. Гранична умова на вході трубопроводу побудована на основі аналізу та обробки заміряних даних при введенні в роботу на компресорній станції додатково одного газоперекачувального агрегату. Тут параметри β_0 і γ відповідають за перехідний час і максимум функції $p(0, t)$.

Оскільки граничні умови задано на функцію тиску, то шуканими величинами є масова витрата для системи (3).

Тому стосовно моделювання газотранспортних систем задача формулюється так: знайти масові витрати газу на кінцях трубопроводу та дослідити вплив на них зміни кінетичної енергії, характеру руху та рельєфу траси.

Розв'язання задачі. При вибраних вище початково-граничних умовах наближений розв'язок системи (3) на послідовному j-му часовому зрізі визначається так

$$\omega(0,t) = \frac{1}{2y_2}\left(\sqrt{y_1^2 - 4y_0 y_2} - y_1\right), \quad \omega(0,t) = \omega(l,t) + \mu_4, \tag{8}$$

де

$$y_1 = 2\mu_4\left(\kappa_{22} + \frac{\alpha}{l}\xi_{22}\right) + \frac{\alpha}{l}\mu_4(\xi_{22} - \xi_{12}) + \frac{4\gamma}{\Delta t}\mu_4 = \omega_{11} - \omega_{21} - \frac{l}{c_s \Delta t}(p_{22} + p_{12} - p_{21} - p_{11})$$

$$y_2 = \kappa_{22} + \frac{2\alpha}{l}(\xi_{22} - \xi_{21}) + \kappa_{12}, \quad y_0 = \mu_1 - \mu_3 - f_1 + \mu_4^2\left(\kappa_{12} + \frac{\alpha}{l}\xi_{22}\right) + \frac{2\gamma}{\Delta t}\mu_4$$

$$\mu_1 = \frac{2}{l}(p_{22} - p_{12}) + \frac{\beta}{l} g\Delta h(\eta_{22} + \eta_{12}), \quad \mu_2 = \gamma(\omega_{21} + \omega_{11}), \quad \mu_3 = \frac{2}{\Delta t}\mu_2$$

$$f_1 = \frac{2}{l}(p_{21} - p_{11}) + \frac{2}{l}(\omega_{21} + \omega_{11})(\upsilon_{21} - \upsilon_{11}) + \frac{\beta}{l} g\Delta h(\eta_{22} + \eta_{12}) + \theta_{21} + \theta_{11}$$

$$\eta(x,t) = \frac{p}{zRT}. \quad \xi(x,t) = \frac{1}{\eta(x,t)}, \quad \kappa(x,t) = \frac{\lambda zRT}{2Dp}, \quad \upsilon = \xi\omega$$

$$\theta(x,t) = \kappa(x,t)\omega(x,t)$$

$$p_{11} = p(0,t_{j-1}), \quad p_{12} = p(0,t_{j-1} + \Delta t), \quad p_{21} = p(l,t_{j-1}), \quad p_{22} = p(l,t_{j-1} + \Delta t),$$

$$\omega_{11} = \omega(0,t_{j-1}), \quad \omega_{12} = \omega(0,t_{j-1} + \Delta t), \quad \omega_{21} = \omega(l,t_{j-1}), \quad \omega_{22} = \omega(l,t_{j-1} + \Delta t),$$

$$\eta_{11} = \eta(0,t_{j-1}), \quad \eta_{21} = \eta(l,t_{j-1}), \quad \eta_{12} = \eta(0,t_{j-1} + \Delta t), \quad \eta_{22} = \eta(l,t_{j-1} + \Delta t).$$

Δt — крок за часом, c_s — середнє значення швидкості звуку в газі. Зміст параметрів θ_{ij}, $i, j = 1, 2$, визначається виглядом функції $\theta(x,t)$.

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

Обчислювальний експеримент. Проведено обчислення для горизонтального трубопроводу з такими параметрами: початковий тиск p_0 = 66,8 атм, об'ємна витрата q_0 = 3516000 м/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 = 122000 м; діаметр — 1,388 м. Результати обчислень подані на рисунках (значення часу подано в хвилинах).

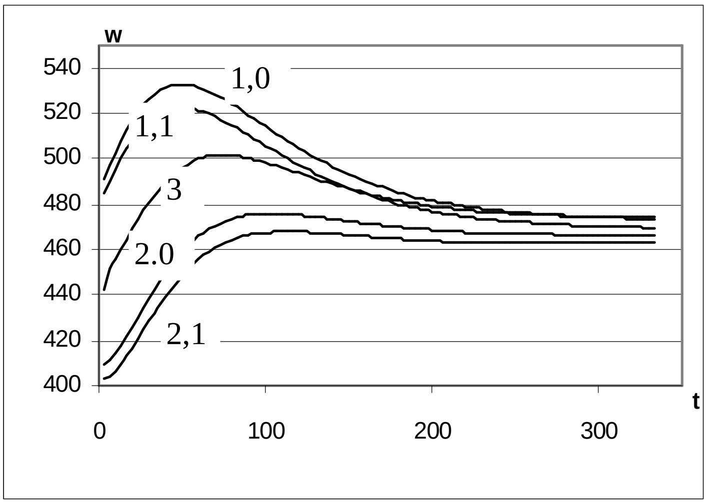

Рис. 1. Залежність вхідної (1_n), вихідної (2_n) та усталеної (3) витрат газу при нехтуванні (n=0) та врахуванні (n=1) зміни кінетичної енергії

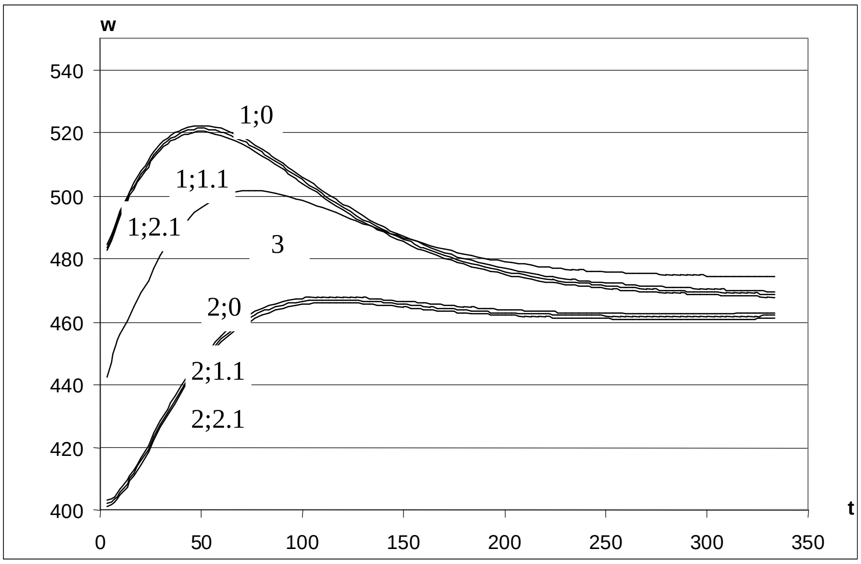

Рис. 2. Залежність вхідної (1_a), вихідної (2_a) та усталеної (3) витрат газу при різних значеннях коефіцієнта Коріоліса a без врахування зміни кінетичної енергії

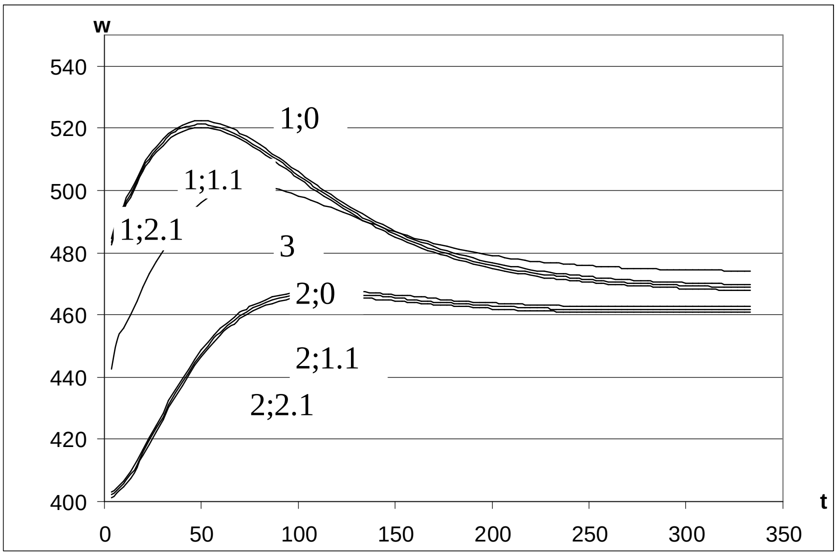

Рис. 3. Залежність вхідної (1_a), вихідної (2_a) та усталеної (3) витрат газу при різних значеннях коефіцієнта характеру руху a з врахуванням зміни кінетичної енергії

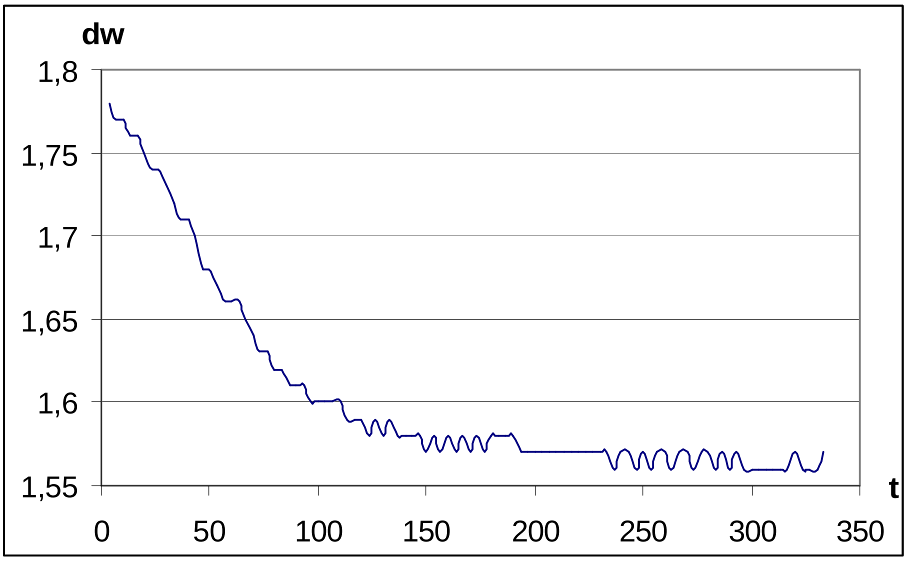

Рис. 4. Залежність зміни витрати газу в часі при піднятті вихідного кінця трубопроводу на 200 метрів без врахування зміни кінетичної енергії

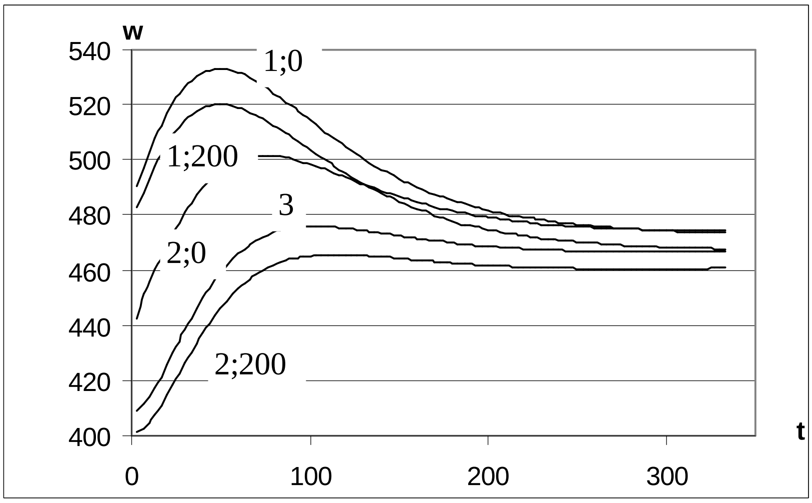

Рис. 5. Залежність вхідної (1_h), вихідної (2_h) та усталеної (3) витрат газу при різних значеннях перепаду висот h, з врахуванням характеру руху та зміни кінетичної енергії

Висновки

Врахування залежності масової витрати від часу істотно впливає на кінцевий результат у початкові (декілька хвилин) моменти часу, який є співмірним з часом дії граничних умов.

При вибраних вхідних параметрах характер руху (ламінарний чи турбулентний) незначно впливає на вихідні результати.

Рельєф траси залягання трубопроводу впливає на вихідні результати в початкові моменти часу.

З аналізу отриманих числових результатів випливає, що в перехідні моменти часу доцільно враховувати всі складові математичної моделі, що описує рух газу в трубопроводі. Оскільки управління процесом руху здійснюється в перехідні часи, то це підтверджує необхідність продовження проведення досліджень у цьому напрямі.

1. П'янило Я. Д. Дослідження нестаціонарного руху газу в трубопроводі з урахуванням градієнта густини та витрати маси // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. — 2008. — Вип. 8. — С. 139–148. 2. Александров А. В., Яковлев Е. И. Проектирование и эксплуатация систем дальнего транспорта газа. — М.: Недра, 1974. — 432с. 3. Трубопровідний

транспорт газу / М.П. Ковалко , В.ЯФ. Грудз, В.Б. Михалків та ін. — К.: Арена, 2002. — 600 с.
4. Вплив зміни параметрів газу на розподіл тиску в горизонтальних трубопроводах / О. Михалевич, Д. Тимків Я. П'янило та ін. // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету: Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. — 2003. — № 4(9). — С. 30–36.

УДК 004.942

А. Струк, Т. Матвійків , Є. Струк, І. Цмоць
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра автоматизованих систем управління

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ПЛАСТОВИХ ТИСКІВ У НАФТОГАЗОВИХ РОДОВИЩАХ

Розглянуто спосіб побудови комп'ютерної моделі нафтогазоносного пласту, що є частиною більш загальної задачі – управління резервуаром. Для знаходження розподілу пластових тисків використано математичний апарат кінцево-різницевих рівнянь. Достовірність функціонування комп'ютерної моделі перевірено на типових тестових прикладах.

The mode of build-up of computer design of oil-and-gas reservoir, which is the part of more general task – the management of reservoi. There is used the a finite difference method for finding of reservoir pressure distribution. The computer model functioning authenticity was tested on typical test examples.

Вступ

Забезпечення народного господарства України енергоресурсами є найактуальнішим завданням нафтогазового комплексу країни, а інформаційні технології дослідження надр та розробки родовищ є важливою складовою успішного вирішення цього завдання. Приросту нафтогазовидобутку можна досягти внаслідок як відкриття нових родовищ і покладів нафти та газу, так і покращання ефективності розробки вже відкритих родовищ, впровадження нових методів підвищення нафтовилучення пластів.

Розроблення інформаційно-аналітичної системи дослідження родовищ нафти і газу є дуже актуальним завданням, а комп'ютерне моделювання пластів є його найважливішою складовою. Комп'ютерне моделювання нафтогазоносного пласту є частиною більш загальної задачі – управління резервуаром. Управління резервуаром – система зовнішніх дій людини, що спрямована на підвищення нафтогазовилучення.

Головна увага зосереджена на комп'ютерному моделюванні та візуалізації отриманих результатів процесу розподілу пластових тисків у нафтогазових родовищах за допомогою числових методів.

Мета роботи

Розроблення комп'ютерної моделі однорідного пласту з використанням чисельних методів.

Характеристика об'єкта дослідження

Об'єктом дослідження є система управління резервуару – нафтогазоносного пласту. Управління (керуючі дії) для такого об'єкта здійснюється за допомогою моделювання процесів, які відбуваються в пласті.

Об'єкт дослідження являє собою складну сукупність елементів, до яких входять геофізичні методи : а) поверхневі – сейсморозвідка, б) глибинні – каротажі; математичні методи і засоби опису