

Наука і сучасні технології

УДК 622.692.4

АНАЛІЗ НЕСТАЦІОНАРНИХ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГАЗОПРОВОДІВ

Ю. Г. Мельниченко, Д. Ф. Тимків

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15., тел. (03422) 48003
informatik@ifdtung.if.ua

Кратко представлены обоснования потребности в применении методов анализа нестационарных неизоэнтальпических потоков в магистральных газопроводах. Проанализированы современные достижения в области математического моделирования нестационарных режимов работы газотранспортных систем. Предложен современный модернизированный метод расчета нестационарных газовых потоков. Представлены преимущества модернизированного метода в сравнении с уже существующим, а также проведена оценка достоверности результатов расчета по разработанному методу

The necessities in application of methods of analysis of unsteady nonisothermal flows in gas pipelines are shortly represented in the paper. Modern achievements in section of mathematical design of the unsteady pipeline regimes of the gas-transport systems are analysed. A boundary problem is formulated and the sweep method is considered for its decision. It is proven an existence of the inaccuracy of method application and offered the method of the considerable diminishing of value of the mentioned inaccuracy. The results of numerical experiment, which confirm efficiency of application of the improved sweep method are represented.

Як відомо [1,2,3], нестационарні процеси в магістральних газопроводах можуть бути зумовлені цілою низкою причин, основними з яких є різного виду керовані зміни режиму експлуатації газотранспортних систем (ГТС) або некеровані аварійні ситуації. Вплив нестационарності на нормальну експлуатацію газопроводів є негативним, в першу чергу, через зниження пропускної здатності системи, а також через можливість виходу значень параметрів газового потоку за межі їх робочого діапазону, що може спричинити позапланове увімкнення/вимкнення деяких газоперекачувальних агрегатів щоб запобігти введенню режиму їх роботи в зону помпажу або зону небезпечних режимів по умові динамічної міцності [4].

Кожна точка довільного газового простору в відносно загальному розумінні характеризується такими величинами: тиском, температурою, повною швидкістю руху частинок газу і густиною газу. Для опису нестационарних потоків в газопроводах використовуються рівняння руху реального газу [5] за допомогою яких можна описати будь-який рух частинок плинного середовища, що досліджується. Для приведення цих рівнянь у газовому просторі виділяють нескінченно малий об'єм газу в околі

цієї точки. Для цього об'єму запишемо закон збереження руху (Рівняння Нав'є-Стокса) та закон збереження маси у векторній формі [5]

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{2} \text{grad} w^2 - w \times \text{rot} w \right) = -\text{grad} p + \frac{4}{3} \text{grad}(\mu \text{div} w) + \text{grad}(w \cdot \text{grad} \mu) - w \Delta \mu + \text{grad} \mu \times \text{rot} w - \text{div} w \text{grad} \mu - \text{rot} \text{rot} \mu w, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho w) = 0, \quad (2)$$

де: p, w, ρ - відповідно тиск, повна швидкість і густина газу в досліджуваній точці; F - складова, що враховує гравітаційні сили; μ - динамічна в'язкість газу; t - час.

Оскільки основних параметрів газу в його точці названо чотири, а рівнянь є два, то до рівнянь (1)-(2) необхідно додати закон збереження енергії та рівняння стану газу [5]

$$\rho c_v \frac{dT}{dt} = \rho q_k + \text{div}(\lambda \text{grad}T) - p \Theta + \mu \Phi; \quad (3)$$

$$p = \rho RT, \quad (4)$$

де: c_v – ізохорна теплоємність газу; q_k – швидкість притоку тепла за рахунок випромінювання; λ – коефіцієнт теплопровідності; Θ – тензор швидкостей; Φ – дисипативна функція.

Систему рівнянь (1)-(4) називають основними рівняннями руху для ідеального газу.

Повернемось до задачі визначення параметрів газового потоку в магістральному газопроводі. Очевидним є той факт, що газодинамічні параметри перекачуваного газу будуть відрізнятися від відповідних параметрів для ідеального газу, що здійснює аналогічний рух. Таким чином, доповнюючи систему рівнянь (1)-(4) додатковими рівняннями та складовими (наприклад, врахування теплообміну з навколишнім середовищем, вибір уточненого методу врахування втрат енергії на тертя, вибір моделі рівняння стану, моделювання радіаційного випромінювання тощо) ми отримуємо основні рівняння руху певною мірою реального газу по ділянці газопроводу. Доцільність та якість врахування особливостей руху реального газу порівняно з ідеальним є одним з об'єктів дослідження науковців даної галузі.

Іншим важливим пріоритетним напрямком дослідження газодинамічних процесів є обґрунтування вибору математичного методу розв'язування вищезгаданої системи диференціальних рівнянь [3]. Слід зауважити, що зі стрімким розвитком мікропроцесорної техніки все більшої актуальності набувають питання поширення саме числових методів розрахунку для розв'язування різного роду інженерних та наукових задач.

Таким чином, для проведення аналізу газодинамічних нестационарних процесів необхідно побудувати систему рівнянь (1)-(4) для об'єкта дослідження з врахуванням значущих особливостей реального процесу відносно ідеального і успішне розв'язання даної системи рівнянь на основі наявних вихідних даних за допомогою обґрунтовано вибраного для такого роду задач математичного методу.

В перспективі рівнянь руху реального газу в магістральних газопроводах, згідно [1], зручно використовувати метод кінцевих елементів. Розширенням методу кінцевих елементів є метод кінцевих об'ємів, який передбачає тривимірне відображення потоку газу. Цей метод знайшов своє відображення в системах автоматизованого конструювання, зокрема в програмному продукті CosmosFloWorks. Однак, якщо ми задаємось метою виконувати аналіз руху газу в протяжних складних газотранспортних системах великих діаметрів, то аналіз потоку газу в тривимірному просторі суттєво не вплине на результат розрахунку порівняно з одновимірним. Аналіз потоку газу в тривимірному просторі можна використовувати як контролюючий для методу аналізу цього потоку в од-

новимірному просторі. Розбіжність в результатах можна знівелювати поправкою у відповідний коефіцієнт в одновимірній моделі процесу (наприклад, в коефіцієнті теплопередачі при проведенні аналізу неізотермічного газового простору).

Таким чином, об'єктом нашого дослідження буде ділянка магістрального газопроводу, а предметом дослідження – чисельний метод розрахунку динаміки параметрів газового потоку в просторі (лінійній координаті x) і в часі τ .

Згідно [1], метод кінцевих елементів, що використовується для обчислення параметрів газового потоку на ділянці магістрального газопроводу, базується на розбитті складної досліджуваної системи на найпростіші елементи. У випадку газотранспортних систем такими елементами є ділянки газопроводів з їх відносно сталими по довжині параметрами. Умовно таке розбиття можна назвати лінійною дискретизацією. Внаслідок змінності параметрів найпростіших елементів в часі, додатково відбувається розбиття елементів на їх стани в певні моменти часу (так звана дискретизація за часом).

Метод полягає в тому, що поставлена задача (в даному випадку розрахунок ділянки газопроводу) розв'язується для одного елемента, а її результати стають вихідними даними для розрахунку наступного елемента.

Розпишемо систему диференціальних рівнянь (1)-(4) в одновимірній просторовій постановці.

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho w) &= 0; \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial x} &= -\frac{\partial p}{\partial x} - \rho \frac{\xi \cdot w |w|}{2 \cdot D}; \\ \frac{\partial(\rho \cdot E)}{\partial t} + \frac{\partial \left[\rho \cdot w \cdot \left(E + \frac{p}{\rho} \right) \right]}{\partial x} &= \quad (5) \\ &= \frac{4K}{D}(T_{o.c.} - T) - \rho \cdot g \cdot w \frac{dh}{dx}; \\ p &= z \cdot \rho \cdot R \cdot T, \end{aligned} \right.$$

де: x – лінійна координата; ξ – коефіцієнт гідравлічного опору; E – повна енергія одиниці маси газу; K – коефіцієнт теплопередачі від газу в оточуюче газопровід середовище; D – внутрішній діаметр ділянки газопроводу; z – коефіцієнт стисливості газу.

Оскільки температура газу змінюється повільніше, ніж тиск, швидкість і густина елементарного об'єму газового потоку, то умовно приймаємо ці величини сталими, а після виконання розрахунку швидкозмінних параметрів значення температури методом послідовних наближень коригуються.

Аналогічно з [1], зводимо диференціальні рівняння (1), (3) і (4) до лінійного виду, представивши їх у вигляді

$$\begin{cases} \frac{\partial M}{\partial t} = a_1 \frac{\partial M}{\partial x} + a_2 \frac{\partial P}{\partial x} + a_3 M; \\ \frac{\partial P}{\partial t} = a_4 \frac{\partial M}{\partial x}, \end{cases} \quad (6)$$

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

$$a_4 = -\frac{1}{\left(\frac{\partial \rho}{\partial P}\right)}.$$

Значення коефіцієнтів a_1 – a_5 , як і значення температури газу, приймаються незмінними в часі і обчислюються згідно прийнятої схеми розбиття.

Для розв'язування системи диференціальних рівнянь виду (2) необхідно мати одну початкову та дві граничні умови [1]. При цьому, граничні умови повинні бути відомими на різних кінцях ділянки. Як граничні умови можуть використовуватись дві різні або одні і ті ж невідомі функції. Згідно з [1] як граничні умови приймалися тиск на вході та масова витрата на виході ГТС. Такий набір граничних умов є досить незручним в практичному застосуванні методу. Справа в тому, що для практичної реалізації описаного в [1] методу необхідно, щоб на виході з досліджуваної газотранспортної системи було встановлено обладнання для вимірювання витрати, а на вході – обладнання для вимірювання тиску. Аналізуючи газотранспортну систему України можна дійти висновку, що обладнання для вимірювання витрати встановлюється досить рідко (у випадку ГТС України пункти виміру витрати газу встановлюються переважно на межах управлінь магістральних газопроводів). Така обставина зумовлена, перш за все, високою вартістю такого обладнання, а також незначною потребою у відомостях щодо витрати газу в кожній ділянці газопроводу з міркувань безпечної його експлуатації. Таким чином, якщо виникає необхідність дослідити динаміку зміни того чи іншого параметра ГТС в певній точці системи, то для реалізації методу, описаного в [1], необхідно розглядати таку систему, в якій вихідна ділянка характеризується відомим розподілом витрати в часі. Якщо точка системи, яка нас цікавить, розміщена далеко від такої ділянки, то ми можемо отримати до розрахунку досить складну газотранспортну систему.

Оскільки найважливішим показником безпечної експлуатації газотранспортної системи є робочий тиск в газопроводі, а також враховуючи простоту будови та відносно низьку вартість обладнання для вимірювання тиску, такі пристрої встановлено на газотранспортних системах значно густіше. Запропонований метод в якості граничних умов вимагає значення тиску

на вході і тиску на виході з газотранспортної системи. Це дає змогу виділити в складній газотранспортній системі невелику, більш просту підсистему. Маючи розподіл в часі значень тиску на вході і виході з даної підсистеми, можна розглядати дану підсистему, як самостійну газотранспортну систему. Таким чином, досліджувана система значно спрощується, що дає змогу значно скоротити об'єм та час проведення обчислень. Суттєвою перевагою розв'язання рівнянь руху газу в магістральному газопроводі тільки за тисками та температурами на вході та виході є те, що ми маємо можливість визначити масову витрату в кожній точці системи в довільний момент часу. Володіння ж такою інформацією, навіть з деякою похибкою, має дуже широке поля для застосування.

Отже, метою проведеного дослідження було отримання методу розрахунку параметрів газотранспортних систем складної конфігурації, який би міг знайти широке застосування в сучасних умовах експлуатації ГТС. Для перевірки достовірності отриманих залежностей провести числовий експеримент шляхом побудови та розрахунку параметрів газотранспортної системи, в якій виникають нестационарні процеси. Оцінити правомірність отриманих залежностей шляхом співставлення результатів розрахунку за існуючою та отриманою методиками та розрахунку значення розбіжності.

Проведемо центрально-різницеву апроксимацію часткових похідних диференціальних рівнянь системи (6). Згрупувавши спільні многочлени, отримаємо рівняння виду

$$\begin{aligned} & \frac{1}{a_4} \frac{1}{\Delta\tau} \frac{P_i^{\tau+\Delta\tau} - P_i^\tau}{\Delta\tau} - \frac{a_9}{a_4} \frac{1}{\Delta\tau} \frac{T_i^{\tau+\Delta\tau} - T_i^\tau}{\Delta\tau} - \\ & - \frac{M_{i+1}^{\tau+\Delta\tau} - M_{i-1}^{\tau+\Delta\tau}}{2\Delta x \cdot \Delta\tau} = \\ & = a_1 \frac{M_{i+1}^{\tau+\Delta\tau} - 2M_i^{\tau+\Delta\tau} + M_{i-1}^{\tau+\Delta\tau}}{\Delta x^2} + \\ & + a_2 \frac{P_{i+1}^{\tau+\Delta\tau} - 2P_i^{\tau+\Delta\tau} + P_{i-1}^{\tau+\Delta\tau}}{\Delta x^2} + \\ & + a_3 \frac{M_{i+1}^{\tau+\Delta\tau} - M_{i-1}^{\tau+\Delta\tau}}{2\Delta x}. \end{aligned} \quad (7)$$

За аналогією з [1] застосуємо для рівняння (7) метод прогонки, попередньо звівши його до вигляду

$$-B_1 \cdot M_{i+1}^{\tau+\Delta\tau} + B_2 M_i^{\tau+\Delta\tau} - B_3 M_{i-1}^{\tau+\Delta\tau} = B_4. \quad (8)$$

При цьому як граничні умови приймаємо:

$$P_N^{\tau+\Delta\tau} = P(\tau + \Delta\tau, l); \quad P_0^{\tau+\Delta\tau} = P(\tau + \Delta\tau, 0). \quad (9)$$

В результаті розв'язання рівняння (8), отримаємо розподіл тиску по довжині ділянки газопроводу.

Тоді масова витрата елемента обчислюється за формулою

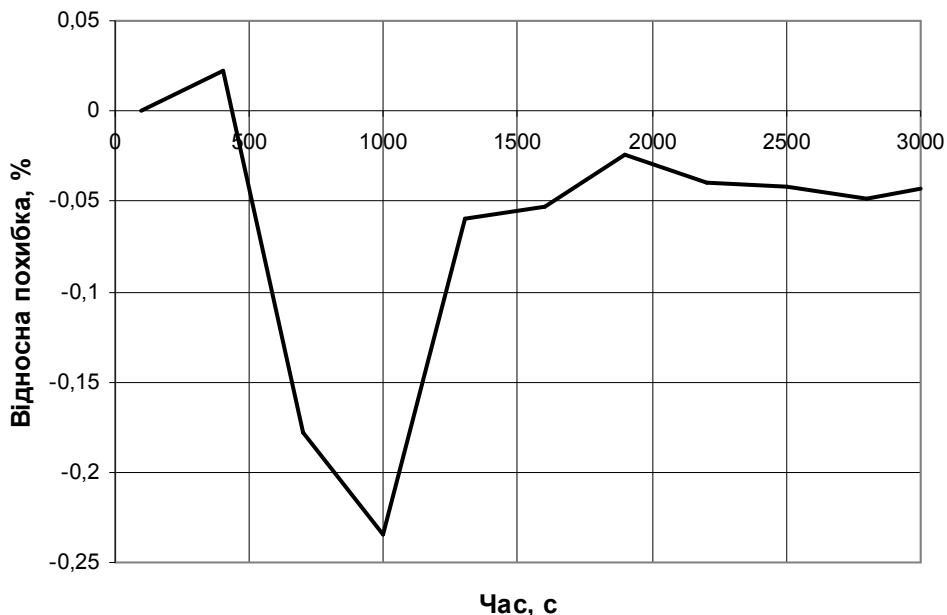


Рисунок 1 - Зміна відносної похибки між масовими витратами на виході ГТС

$$M_i^{\tau+\Delta\tau} = \left(\frac{a_1(P_i^{\tau+\Delta\tau} - P_i^\tau - a_{10}(T_{i+1}^{\tau+\Delta\tau} - T_{i-1}^{\tau+\Delta\tau}))}{a_5} + \frac{a_2 \cdot \Delta\tau \cdot (P_{i+1}^{\tau+\Delta\tau} - P_{i-1}^{\tau+\Delta\tau})}{2 \cdot \Delta x} + a_3 \cdot \Delta\tau \cdot M_i^\tau \right) \times \frac{1}{(1 - a_3 \Delta\tau)} \quad (11)$$

Таким чином, ми отримали розв’язок системи (6) для агрегату, а, отже, і для цілої газотранспортної системи.

З метою перевірки точності наведеного алгоритму розрахунку нестационарного газового потоку проведено його порівняння з алгоритмом [1]. Розрахунок проводився за двома програмами на ЕОМ. При цьому проведено порівняльний аналіз результатів програм. Порівняння проводилось так: приймалися відомі вихідні граничні умови, представлені масивом тисків та температур газу на вході та значень масової витрати на виході з ГТС. Кожен набір даних характеризувався певним моментом часу. Інтервали часу, протягом яких діяли визначені граничні умови, приймалися рівними між собою. Методом кінцевих елементів згідно прийнятих граничних умов визначались значення тиску на виході з ГТС у відповідні моменти часу. Отриманий розподіл в часі кінцевого тиску приймався як граничні умови. Інші граничні умови, а саме розподіл в часі тиску та температури на вході в ГТС, приймалися такими ж, як і в попередньому розрахунку. Проводився розрахунок параметрів ГТС за приведеним вище методом, в результаті чого отримували розподіл в часі масової витрати на виході з ГТС. Отримані значення масової витрати порівнюва-

ли з відповідними значеннями масової витрати, що були прийняті як вихідні граничні умови за формулою

$$\delta M = \frac{M_{omp.} - M_{вих.}}{M_{вих.}} \cdot 100\% \quad (12)$$

В свою чергу, отриманий розподіл в часі масової витрати на виході з ГТС можна підставити як граничні умови та провести розрахунок параметрів газового потоку за методикою [1] повторно. Отримаємо, таким чином, ще один розподіл в часі тиску на виході ГТС. Проведемо порівняння отриманого повторно розподілу тиску з розподілом, отриманим при першому розрахунку

$$\delta P = \frac{P_{2\,omp.} - P_{1\,omp.}}{P_{1\,omp.}} \cdot 100\% \quad (13)$$

Поведінка відносних похибок масової витрати та тиску в часі наведені відповідно на рисунках 1 і 2.

З рисунків видно, що відносна похибка прямує до нуля. Максимальне значення відносної похибки як для тиску, так і для масової витрати, припадає на момент часу, в який виникає збурення нестационарності. Впродовж всього проміжку часу значення відносної похибки по масовій витраті за модулем не перевищила величини 0,3%, а за тиском – 0,01%, що дає підстави нам зробити висновок про правомірність наведеного методу розрахунку нестационарних процесів, які виникають в газотранспортних системах.

Незважаючи на названі переваги розробленого авторами методу, право на існування мають обидва способи моделювання нестационарних процесів в газопроводах. Який саме спосіб буде обрано при математичному моде-

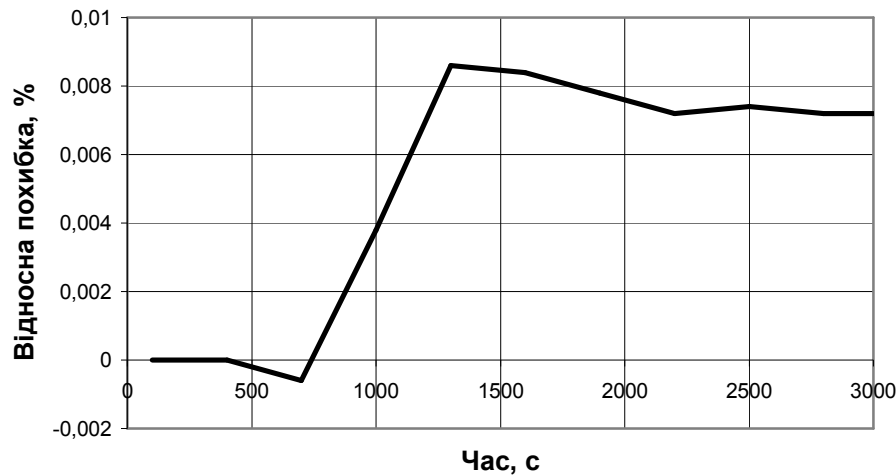


Рисунок 2 - Зміна відносної похибки між тисками на виході ГТС

люванні нестационарних процесів, залежить від того, якими граничними умовами ми в змозі оперувати.

Розглянутий метод може знайти своє застосування під час вирішення завдань, пов'язаних з виконанням ремонтних робіт, а також з моделюванням аварійних ситуацій. Внаслідок поширеності манометрів на лінійній частині газотранспортних систем перспективним є застосування даного методу для розрахунку параметрів нестационарного потоку газу в ізольованій ділянці газопроводу. Також до перспектив розвитку даного методу можна віднести врахування профілю траси і інтеграцію даного методу в алгоритми комплексної оцінки показників газотранспортних систем складної конфігурації з пересіченим профілем траси.

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 Тугонов П.И. Газогидродинамические и тепловые процессы при испытании магистральных газопроводов. М., 1986.
- 3 Грачев В.В., Щербаков, С.Г., Яковлев Е.И. Динамика трубопроводных систем. – М.: Наука, 1987.
- 4 Правила технической эксплуатации магистральных газопроводов. – М.: Недра, 1982, 158 с.
- 5 Рахматулин Х.А., Сагомоян А.Я., Бунимович А.И., Зверев И.Н.. Газовая динамика. – М.: Высшая школа, 1965. – 722 с.

II Всеукраїнська наукова конференція

НАЦІОНАЛЬНЕ ПІДПРИЄМНИЦТВО: ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

м. Київ
(17 – 18 листопада 2007 р.)

Оргкомітет конференції

Міжрегіональна академія
управління персоналом,
03039, м. Київ, вул. Фрометівська, 2
kub@bigmir.net

Антонюк Олександр Васильович
Тел.: (044) 524 57 96, 490 95 25

Тематика конференції:

- Державне регулювання розвитку бізнесу в Україні
- Стратегічний менеджмент у системі організації
- Управління виробництвом промислового підприємництва
- Управління персоналом на підприємствах та в організаціях
- Управління інноваційними та інвестиційними процесами в бізнесі
- Фінансовий менеджмент
- Управління конкурентоспроможністю та ефективністю функціонування вітчизняних підприємств в умовах глобалізації ринку
- Безпека бізнесу та управління організацією в кризових ситуаціях
- Сучасні тенденції становлення та розвитку підприємництва в Україні та за кордоном