

УДК 681.5.017:681.121.84

Ф. Матіко,* І. Учитель**

*Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів
**Відкрите акціонерне товариство “Одесагаз”

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ГАЗОВОГО ПОТОКУ ПРИ ЙОГО ПРОТІКАННІ ЧЕРЕЗ ПРИСТРОЇ ЗВУЖЕННЯ

© Матіко Ф., Учитель І., 2003

The article contains the results of analysis of thermodynamic processes at gas flowing through restrictions. There is specified the application area of thermodynamic processes equations.

Постановка проблеми в цілому

Протікання газу через пристрої звуження супроводжується зміною параметрів стану газу (тиску, температури, густини) вздовж ділянки трубопроводу із ненульовим градієнтом швидкості газу по довжині трубопроводу. Неврахована зміна параметрів газу на ділянці встановлення пристроїв звуження та після них може зумовити виникнення додаткових похибок вимірювання витрати. Одним із таких неврахованих чинників в багатьох випадках є зміна температури газу. Наприклад, зміна температури газу в горловині пристрою звуження приведе до того, що пристрій звуження системи обліку та її вимірювальний перетворювач температури, розміщений на відстані 4 ... 8 D_{20} після пристрою звуження або 10 ... 20 D_{20} до пристрою звуження, знаходитимуться в зоні різних температур газового потоку, що призведе до появи додаткової складової похибки вимірювання витрати газу. Іншим прикладом неврахованого чинника зміни температури є встановлення систем обліку газу після редукторів ГРС. Внаслідок дроселювання в редукторах ГРС температура газу істотно знижується, в результаті чого система обліку перебуває у зоні температурного градієнта по довжині труби. Тобто конструктивні елементи системи мають різні температури і це є ще однією складовою похибки вимірювання витрати.

Аналіз останніх публікацій

Проблеми впливу зміни температури природного газу при його протіканні через пристрої звуження на точність обліку газу розглядаються в [1, 2]. В [1] розглянуто велику кількість технологічних процесів, які приводять до появи градієнта температури по довжині трубопроводу, однак не розглядається задача математичного опису цих процесів. В [3] для розрахунку зміни температури внаслідок дроселювання на пристроях звуження пропонується застосовувати рівняння ізентальпійного процесу, хоча при цьому наголошено, що для перевірки достовірності застосування цього рівняння для різних пристроїв звуження необхідно провести експериментальні дослідження.

Постановка завдань

Авторами поставлено за мету провести аналіз термодинамічних процесів, які відбуваються при протіканні газу через пристрої звуження, дати термодинамічну класифікацію цих процесів та визначити область застосування рівнянь різних термодинамічних процесів.

Для спрощення моделей процесу витікання газу через різноманітні дроселі доцільно обмежитись розглядом стаціонарного руху газу, оскільки кожний нестационарний процес можна уявити як послідовність квазістаціонарних процесів, тобто стаціонарних в межах невеликої зміни параметрів газу. Крім того, обмежимось розглядом теплоізолюваних (без теплообміну з довкіллям) процесів протікання газу.

Стан газу в термодинамічних процесах при одночасній зміні всіх параметрів можна описати рівнянням політропи [4, 5]

$$p v^n = \text{const}, \quad (1)$$

де p – абсолютний тиск газу;

v – питомий об'єм;

n – показник політропи, який для ідеалізованих термодинамічних процесів (ізохорного, ізобарного) при одному сталому параметрі вважають величиною сталою [4, 5].

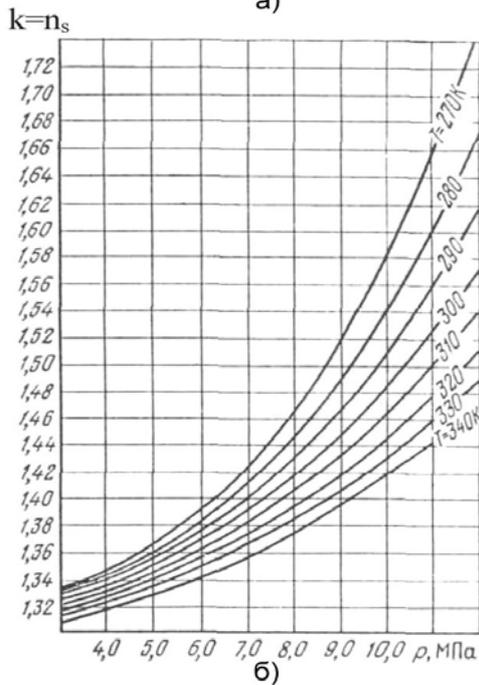
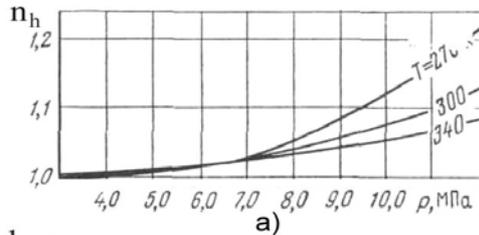


Рис. 1. Залежність показників n_h і n_s від тиску та температури

Показник політропи реальних газів залежить від параметрів стану газу. Зокрема для адиабатного ($dS=0$) та ізоентальпійного ($dh=0$) процесів реальних газів їх показники можна подати як функції термодинамічних параметрів газу – тиску p , температури T , питомого об'єму v так [4]:

$$\chi = n_s = -\frac{v}{p} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_s, \quad (2)$$

$$n_h = -\frac{v}{p} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_h.$$

Залежності показника адиабати χ та показника ізоентальпійного процесу n_h метану від тиску та температури показані на рис. 1 [4]. Порівняння значень показників χ та n_h при однакових значеннях параметрів p , T свідчить про те, що результати моделювання деякого термодинамічного процесу значно відрізнятимуться залежно від того, рівняння якого саме процесу (ізоентропійного чи ізоентальпійного) буде покладено в основу моделі.

Область застосовності рівняння ізоентальпійного процесу для опису процесів протікання газів через пристрої звуження в умовах стаціонарного газового потоку можна визначити з аналізу рівняння першого закону термодинаміки по балансу робочого тіла [4, 5]

$$\delta q = dh + \delta \varpi, \quad (3)$$

де $\delta q = \delta q^* + \delta q^{**}$ – сумарна питома теплота зворотного та незворотного процесу;

δq^* – зовнішня теплота, що передається газу через стінку труби (зворотний процес);

δq^{**} – теплота незворотних процесів (тертя, втрати в неактивних зонах тощо);

dh – приріст питомої ентальпії газу;

$\delta \varpi = -v dp$ – питома потенціальна робота газу між двома перерізами трубопроводу за рахунок зміни тиску газу.

Рівняння потенціальної роботи газового потоку можна записати у вигляді [4]

$$\delta\omega = \delta l^* + d\left(\frac{v^2}{2}\right) + gdz + \delta\omega^{**}, \quad (4)$$

де δl^* – питома зовнішня робота потоку (обертання колеса турбіни тощо);

$\delta\omega^{**}$ – питома потенціальна робота, витрачена на подолання опору трубопроводу чи дротеля;

gdz – зміна потенціальної енергії потоку за рахунок зміни висоти z трубопроводу;

$d\left(\frac{v^2}{2}\right)$ – зміна кінетичної енергії потоку за рахунок зміни швидкості газу.

З врахуванням (4) рівняння (3) набуває вигляду:

$$\delta q^* + \delta q^{**} = dh + \delta l^* + d\left(\frac{v^2}{2}\right) + gdz + \delta\omega^{**}. \quad (5)$$

Якщо розглядати коротку ділянку трубопроводу з встановленим всередині пристроєм звуження при відсутності теплообміну труби з довкіллям (рис. 2), то $\delta q^* = 0$ – зовнішній теплообмін відсутній, $\delta l^* = 0$ – газ не виконує роботи над зовнішніми тілами.

За умови відсутності теплообміну з довкіллям $\delta q^* = 0$ робота незворотних процесів $\delta\omega^{**}$ повністю перетворюється у внутрішнє тепло $\delta q^{**} = \delta\omega^{**}$. Для горизонтального трубопроводу зміна висоти перерізу II відносно I відсутня $dz=0$. Якщо припустити, що швидкості потоку до та після пристрою звуження рівні $v_2=v_1$, то зміна кінетичної енергії відсутня ($d\left(\frac{v^2}{2}\right)=0$) і рівняння (5) набуває вигляду

$$dh = 0. \quad (6)$$

Тобто процес незворотного дроселювання газу (перетікання газу із області більшого тиску в область меншого тиску) є ізоентальпійним. Однак потрібно підкреслити, що процес дроселювання газу є ізоентальпійним лише за умови, що розглядаються два перерізи потоку з рівними швидкостями (перерізи I, II на рис. 2).

З рівняння повного диференціала ентальпії h за умови (6) випливає рівняння зміни температури в процесі дроселювання газу (рівняння дросельного ефекту, ефекту Джоуля – Томсона) [4, 5]

$$dT = \frac{T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v}{c_p} dp = D_h dp. \quad (7)$$

Відповідно рівняння інтегральної зміни температури при ізоентальпійному переході газу від тиску p_1 до p_2 має вигляд

$$T_2 - T_1 = \int_{p_1}^{p_2} D_h dp. \quad (8)$$

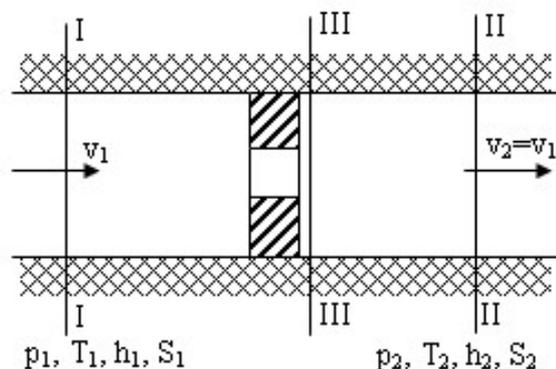


Рис. 2. Схема процесу дроселювання

При виведенні рівняння витрати для методу змінного перепаду тиску розглядаються два перерізи з різними швидкостями потоку (переріз I та переріз III близький до вихідного торця пристрою звуження на рис. 2). Отже, процес протікання газу від перерізу I до перерізу III не є ізентальпійним. Якщо припустити, що газ, який протікає через пристрій звуження, є близький до ідеального газу, то за відсутності теплообміну з довкіллям процес можна вважати адіабатним (ізоентропійним).

В основу ізоентропійного процесу покладено рівняння першого закону термодинаміки по балансу зовнішньої теплоти та роботи [4]

$$\delta q^* = du + \delta l^*, \quad (9)$$

де du – зміна внутрішньої енергії газу.

Для зворотних процесів ідеального газу рівняння (9) можна записати у вигляді

$$Tds = c_v dT + pdv. \quad (10)$$

Враховуючи, що для адіабатного (ізоентропійного) процесу $\delta q^* = 0$ ($ds=0$), та застосувавши рівняння стану ідеального газу $pv = RT$ та закон Майєра із (10), отримаємо рівняння виду (1) із показником $n_{S_i} = c_p / c_v$. Заміна показника n_{S_i} на показник χ , обчислений за (2), дає змогу врахувати властивості реального газу, однак не враховує жодним чином незворотні втрати при дроселюванні. Отже, рівняння політропи (1) із показником (2) описує ідеальний ізоентропійний процес за відсутності втрат енергії потоку за рахунок тертя газу об стінки труби, утворення неактивних зон і його доцільно застосовувати для опису процесів із незначними незворотними перетвореннями енергії (процесів витікання газу через сопла, витратомірні труби тощо). Для процесів із значним зниженням тиску в результаті дроселювання (значними незворотними втратами), наприклад, для протікання газу через діафрагму при значних відношеннях втрат тиску $\Delta\omega$ до тиску газу p застосування рівняння адіабати дає занижені значення температури після діафрагми (таблиця). Перевагою рівняння адіабати є те, що на відміну від залежності (8) дросельного ефекту рівняння адіабати є рівнянням стану газу і може бути застосовано для опису стану газу в довільних перерізах трубопроводу незалежно від співвідношення швидкостей потоку в цих перерізах.

Таблиця

**Результати розрахунку зміни температури метану в адіабатному процесі
($p_1=0.4$ МПа, $T_1=283.15$ К)**

$\frac{\Delta\omega}{p_1}$	0.01	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1	0.15
$T_2, \text{ К}$	282.47	281.79	281.41	279.01	277.58	276.13	272.39
$T_1-T_2, \text{ К}$	0.68	1.36	1.74	4.14	5.57	7.02	10.76

Взагалі зіставлення ізентальпійного та ізоентропійного переходу газу від тиску p_1 до тиску p_2 зручно провести за допомогою T - s чи h - s діаграми газу. Наприклад, на рис. 3 показано фрагмент T - s діаграми метану, на якому зображено ізентальпійний та ізоентропійний переходи метану від тиску $p_1=15$ ат до $p_2=10$ ат. Ізентальпійний перехід відбувається по кривій 1-2 ($h=200$ ккал/кг), адіабатний – по лінії 1-2'. Зміна температури метану

при ізоентальпійному переході становить $\Delta T = 3.5$ К, при ізоентропійному (адіабатному) – $\Delta T = 29$ К. Зміна ентальпії в адіабатному переході 1-2' становить $h_2 - h_1 = 187 - 200 = -13$ ккал/кг. Це максимально можливий адіабатний теплоперепад, який може бути затрачений на виконання газом зовнішньої роботи. Реальний адіабатний теплоперепад і відповідно різниця температур в адіабатному процесі будуть меншими.

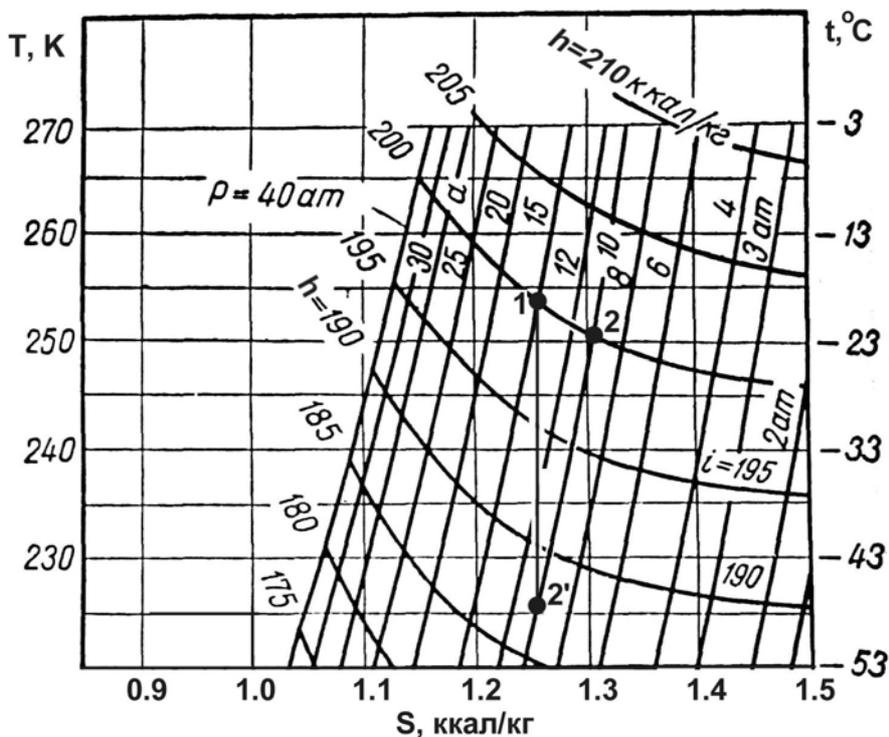


Рис. 3. Фрагмент T-S діаграми метану

Отже, процес незворотного дроселювання газу (протікання газу із області більшого тиску в область меншого тиску) є ізоентальпійним. Рівняння диференціального (7) та інтегрального (8) дросельного ефекту (ефекту Джоуля – Томсона) дають можливість обчислити різницю температур в ізоентальпійному процесі між двома перерізами потоку газу з однаковою швидкістю. Тобто математична модель процесу, побудована на основі рівнянь (7), (8), пов'язує кінцевий та початковий стаціонарні стани газу при дроселюванні. Для розрахунку значень температури в проміжних перерізах може бути застосоване рівняння адіабати, яке дає добрі результати тільки для газів, близьких до ідеальних. Крім того, процес дроселювання газу можна вважати ізоентальпійним тільки при виконанні всіх умов, які уможливають перейти від рівняння (5) до (6). Якщо деякі з цих умов (наприклад, відсутність теплообміну з довкіллям) можна забезпечити певними технологічними заходами, то інші (рівність швидкостей потоку в порівнюваних перерізах) в умовах газового потоку можуть бути порушені, що призведе до відхилень розрахункових значень температури від реальних.

Висновки

В роботі визначено область застосування рівнянь різних термодинамічних процесів. Встановлено, що за умови відсутності теплообміну з довкіллям та рівності швидкостей потоку до та після пристрою звуження процес протікання газу через пристрій звуження є

ізоентальпійний. Проведено порівняльний аналіз математичних моделей процесу протікання газу через пристрій звуження, побудованих на основі рівнянь адіабатного та ізоентальпійного процесу. Для підтвердження адекватності моделей в умовах роботи пристроїв звуження на пунктах обліку природного газу необхідне проведення експериментальних досліджень, що дасть можливість розробити корегуючі залежності для усунення систематичних складових похибки вимірювання витрати газу за методом змінного перепаду тиску.

1. *Волосянко В.Д., Волосянко Л.С. Неврахований вплив температурного чинника на достовірність приладного обліку витрат природного газу // Нафтова і газова промисловість. – 2002. – №6. – С. 45 – 47.* 2. *Пістун Є.П., Учитель І.Л. Сучасні проблеми обліку природного газу // Матеріали III Всеукраїнської наук.-техн. конф. “Вимірювання витрати та кількості газу і нафтопродуктів”. – Івано-Франківськ, 2003. – С. 11.* 3. *ISO/DIS 5167-1. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full. – Part 1. – 2000. – 37 p.* 4. *Поршаков Б.П., Бикчентай Р.Н., Романов Б.А. Термодинамика и теплопередача (в технологических процессах нефтяной и газовой промышленности): Учебник для вузов. – М., 1987.* 5. *Беляев Н.М. Термодинамика. – К., 1987.*

УДК 681.121.89

Р. Дебрянська, І. Стасюк

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів

ГАЗОДИНАМІЧНІ ЗАДАВАЧІ-ВИТРАТОМІРИ В СИСТЕМІ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОБУТОВИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ КІЛЬКОСТІ ГАЗУ

© Дебрянська Р., Стасюк І., 2003.

The possibilities of application of gas dynamic throttle setting devices and flowmeters of gas for metrology test of home counters of an amount of natural gas are analyzed.

Вступ

Однією з найважливіших проблем, яку повинна вирішувати Україна в час свого становлення, є економія паливно-енергетичних ресурсів. Економія паливно-енергетичних ресурсів, зокрема природного газу, можлива лише у випадку раціонального їх споживання та точного обліку на всіх ділянках людської діяльності, починаючи від джерел постачання та закінчуючи споживачами. Ця економія через облік природного газу визначається точністю засобів вимірювань витрати і кількості (об'єму) газу.

Для вимірювання кількості природного газу в комунально-побутовій сфері застосовують переважно барабанні, роторні та турбінні лічильники кількості газу різних типорозмірів залежно від кількості та потужності обслуговуваних ними споживачів природного газу. В останні роки почали також розвиватися і знаходити застосування