

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ДРОСЕЛЮВАННЯ ДЛЯ УСУНЕННЯ ДОДАТКОВИХ ПОХИБОК СИСТЕМ ОБЛІКУ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

О Матіко Ф.Д., Масняк О.Я., 2008

Наведено аналіз існуючих методів та нову методику розрахунку коефіцієнта дроселювання, необхідну для врахування додаткової похибки визначення температури природного газу у витратомірах змінного перепаду тиску.

Analysis of existing methods and a new methodic of calculation of Joule-Thomson coefficient are presented in the paper. The methodic is necessary for elimination of additional error of calculation natural gas temperature at pressure differential flowmeters.

Постановка проблеми. 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 факторів здебільшого є зміна температури газу. Наприклад, зміна температури газу в горловині пристрою звуження і по довжині трубопроводу після нього призводить до того, що пристрій звуження системи обліку та її вимірювальний перетворювач температури, розміщений на відстані 5–15 D_{20} [1] після пристрою звуження, знаходяться в зоні різних температур газового потоку, що спричиняє появу додаткової складової похибки вимірювання витрати газу.

В системах обліку на основі методу змінного перепаду тиску немає можливості виміряти температуру газу в перерізі пристрою звуження без спотворення кінематичної структури потоку перед ним. Тому різницю температур газу перед пристроєм звуження та в місці розміщення перетворювача визначають [1] розрахунково, застосовуючи інтегральне рівняння дросельного ефекту, (ефекту Джоуля-Томсона). Для реалізації цього рівняння необхідно мати значення коефіцієнта дроселювання (коефіцієнта Джоуля-Томсона), який є функцією тиску, температури та складу природного газу.

Аналіз останніх досліджень. Проблеми впливу зміни температури природного газу у разі його протікання через пристрої звуження на точність обліку газу розглянуті в роботі [2]. У [3] для розрахунку зміни температури внаслідок дроселювання на пристроях звуження пропонується застосовувати рівняння ізоентальпійного процесу, хоча при цьому наголошено, що для перевірки достовірності застосування цього рівняння для різних пристроїв звуження необхідно виконати експериментальні дослідження. У роботі [4] виконано аналіз термодинамічних процесів, які відбуваються у разі протікання газу через пристрої звуження, наведено термодинамічну класифікацію цих процесів та визначено сферу застосування рівнянь різних термодинамічних процесів. Однак задача розрахункового визначення коефіцієнта дроселювання (коефіцієнта Джоуля-Томсона) не розглянута детально у вказаних роботах.

Формулювання цілей статті. У нині чинних в Україні стандартах із визначення властивостей природного газу ГОСТ 30319 [5] та міжнародному стандарті за відомого повного компонентного складу природного газу. Однак запропоновані рівняння є складними, і, крім того, переважна більшість обчислювачів витрати природного газу передбачають введення спрощених даних про склад газу (густина за стандартних умов, вмісту азоту, вмісту вуглекислого газу). Автори

поставили за мету розробити спрощену методику, яка дасть змогу обчислювати значення коефіцієнта дроселювання за спрощеними даними про склад газу.

Виклад основного матеріалу. Сфера 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 за балансом робочого тіла [7, 8]

$$dq = dh + dv, \quad (1)$$

де $dq = dq^* + dq^{**}$ – сумарна питома теплота зворотного та незворотного процесу, dq^* – зовнішня теплота, що передається газу через стінку труби (зворотний процес), dq^{**} – теплота незворотних процесів (тертя, втрати в неактивних зонах тощо); dh – приріст питомої ентальпії газу; $dv = -udp$ – питома потенціальна робота газу між двома перерізами трубопроводу за рахунок зміни тиску газу, де p – абсолютний тиск газу, u – питомий об'єм.

Рівняння потенціальної роботи газового потоку можна записати у вигляді [7]

$$dv = dl^* + d(v^2/2) + gdz + dv^{**}, \quad (4)$$

де dl^* – питома зовнішня робота потоку (обертання колеса турбіни тощо); dv^{**} – питома потенціальна робота, втрачена на подолання опору трубопроводу чи дроселя; gdz – зміна потенціальної енергії потоку за рахунок зміни висоти z трубопроводу; $d(v^2/2)$ – зміна кінетичної енергії потоку за рахунок зміни швидкості газу.

З врахуванням (2) рівняння (1) набуває вигляду

$$dq^* + dq^{**} = dh + dl^* + d\left(\frac{v^2}{2}\right) + gdz + dv^{**}. \quad (3)$$

Якщо розглядати коротку ділянку трубопроводу з встановленим всередині пристроєм звуження за відсутності теплообміну труби з навколишнім середовищем (див. рис. 1), то $dq^* = 0$ – зовнішній теплообмін відсутній, $dl^* = 0$ – газ не виконує роботи над зовнішніми тілами. За умови відсутності теплообміну з навколишнім середовищем $dq^* = 0$ робота незворотних процесів dv^{**} повністю перетворюється у внутрішнє тепло $dq^{**} = dv^{**}$. 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 ($d(v^2/2)=0$) і рівняння (3) прийме вигляд

$$dh = 0. \quad (4)$$

Тобто процес незворотного дроселювання газу (перегікання газу із області більшого тиску в область меншого тиску) є ізоентальпійним. Однак потрібно зазначити, що процес дроселювання газу є ізоентальпійним лише за умови, що розглядаються два перерізи потоку з рівними швидкостями (перерізи I, II на рис.1).

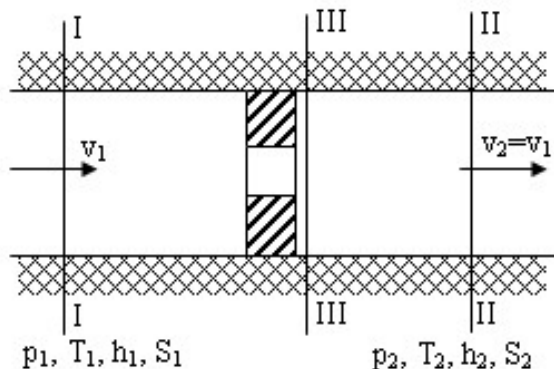


Рис. 1. Схема процесу дроселювання

З рівняння повного диференціалу ентальпії h за умови (4) впливає рівняння зміни температури під час дроселювання газу (рівняння дросельного ефекту, ефекту Джоуля-Томсона) [7, 8]

$$dT = \frac{T \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_p - u}{c_p} dp = D_h dp. \quad (5)$$

Відповідно рівняння інтегральної зміни температури у разі ізентальпійного переходу газу від тиску p_1 до p_2 має вигляд

$$T_2 - T_1 = \int_{p_1}^{p_2} D_h dp \quad (6)$$

Отже, визначення різниці температури газу в двох перерізах потоку із рівними швидкостями, наприклад температури перед пристроєм звуження потоку T_1 та температури в точці розміщення перетворювача за діафрагмою T_2 можливе за умови, що відомий коефіцієнт дроселювання D_h . Як очевидно із (5), для визначення D_h необхідно обчислювати ізобарну теплоємність газу c_p , параметри рівняння стану газу (питомий об'єм u) та деякі похідні від рівняння стану.

Рівняння стану газу може мати різний вигляд залежно від того, які незалежні параметри стану воно зв'язує. Для опису стану природного газу чинні нормативні документи (зокрема [5]) пропонують рівняння стану вигляду $Z = f(p, T)$, $Z = f(r, T)$.

Зокрема для розрахунку коефіцієнта дроселювання D_h на основі рівняння стану ВНИЦ СМВ [5], яке має вигляд $Z = f(r, T)$, формулу (5) необхідно перетворити до вигляду [9]

$$D_h = \frac{T \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_r - r \left(\frac{\partial Z}{\partial r} \right)_T}{c_p r \left[Z + r \left(\frac{\partial Z}{\partial r} \right)_T \right]} \quad (7)$$

На основі формули (7) та рівняння стану ВНИЦ СМВ [5], автори отримали таке рівняння для розрахунку коефіцієнта дроселювання:

$$D_h = \frac{10^3 (A_2 - A_1)}{c_p r (1 + A_1)}, \quad (8)$$

де D_h – коефіцієнт дроселювання, К/МПа; c_p – питома ізобарна теплоємність газу, кДж/(кг*К); r – густина газу в робочих умовах, кг/м³; A_1 , A_2 – безрозмірні комплекси, які обчислюються згідно з ГОСТ 30319.3-96 [5].

У міжнародному стандарті ISO 20765-1 [6] запропонований дещо інший підхід до визначення термодинамічних властивостей природного газу, зокрема до визначення коефіцієнта Джоуля-Томсона. У стандарті наведено фундаментальне рівняння, яке визначає зв'язок вільної енергії Гельмгольца із приведеними густиною, температурою та компонентним складом газу. Рівняння для визначення термодинамічних властивостей отримані на основі рівнянь часткових похідних від вільної енергії Гельмгольца. Метод, запропонований в ISO 20765-1 [6], призначений для розрахунку властивостей сумішей у газоподібному стані і має широку сферу застосування за зміною тиску ($p \leq 30$ МПа) та температури ($250 \text{ K} \leq T \leq 350 \text{ K}$).

З погляду застосування у обчислювачах витрати обидва вказані методи: метод на основі формули (8) та рівняння стану ВНИЦ СМВ та метод ISO 20765-1 мають деякі недоліки. Обидва методи реалізовані на основі рівнянь із взаємозалежними параметрами (Z, p) , (p, r) , які можуть бути розв'язані тільки ітераційно, що збільшує обчислювальне навантаження процесорів у обчислювачах. Методи вимагають введення даних про повний компонентний склад газу, що вимагає переробки програмного забезпечення сучасних обчислювачів, переважна більшість яких орієнто-

вана на введення спрощених даних про склад газу. Тому актуальним є розроблення спрощеної методики для розрахунку коефіцієнта Джоуля-Томсона за трьома параметрами складу природного газу – густиною за стандартних умов, вмістом азоту та вуглекислого газу.

Автори розробили таку спрощену методику для розрахунку коефіцієнта Джоуля-Томсона у діапазоні абсолютного тиску від 0,1 МПа до 15 МПа та температури від 250 К до 350 К. Вказані діапазони зміни тиску та температури характерні для задач обліку природного газу за його транспортування та розподілу.

Методика побудована на основі принципу відповідних станів. Основне рівняння методики описує залежність коефіцієнта Джоуля-Томсона від приведених температури та густини. Коефіцієнти основного рівняння отримані за допомогою апроксимації значень коефіцієнта Джоуля-Томсона для базової суміші, отриманих за ISO 20765-1 [6]. Апроксимацію виконано в діапазоні тиску від 0,1 МПа до 15,0 МПа та температури від 250 К до 350 К.

Залежності коефіцієнта Джоуля-Томсона від тиску за фіксованих значень температури для цієї практично важливої галузі показані графічно на рис.2. Залежності побудовані за значеннями ISO 20765-1 для природного газу такого складу: густина за стандартних умов – 0,701 кг/м³, вміст азоту – 0,997 %, вміст вуглекислого газу – 0,612 %.

Як очевидно із цього рисунка, коефіцієнт Джоуля-Томсона D_h приймає максимальні значення за низьких тиску та температури. Чутливість коефіцієнта D_h до зміни температури зростає із зменшенням тиску. За високого тиску ($p > 10$ МПа) істотно зменшуються як значення коефіцієнта дроселювання, так і його чутливість до зміни температури. Якщо виділити область значень D_h за тиску газу до 5 МПа, а це область застосування переважної більшості витратомірів змінного перепаду тиску, то видно, що тут значення коефіцієнта D_h близькі до максимальних, а отже, врахування процесу дроселювання саме у цьому діапазоні зміни тиску є найважливішим.

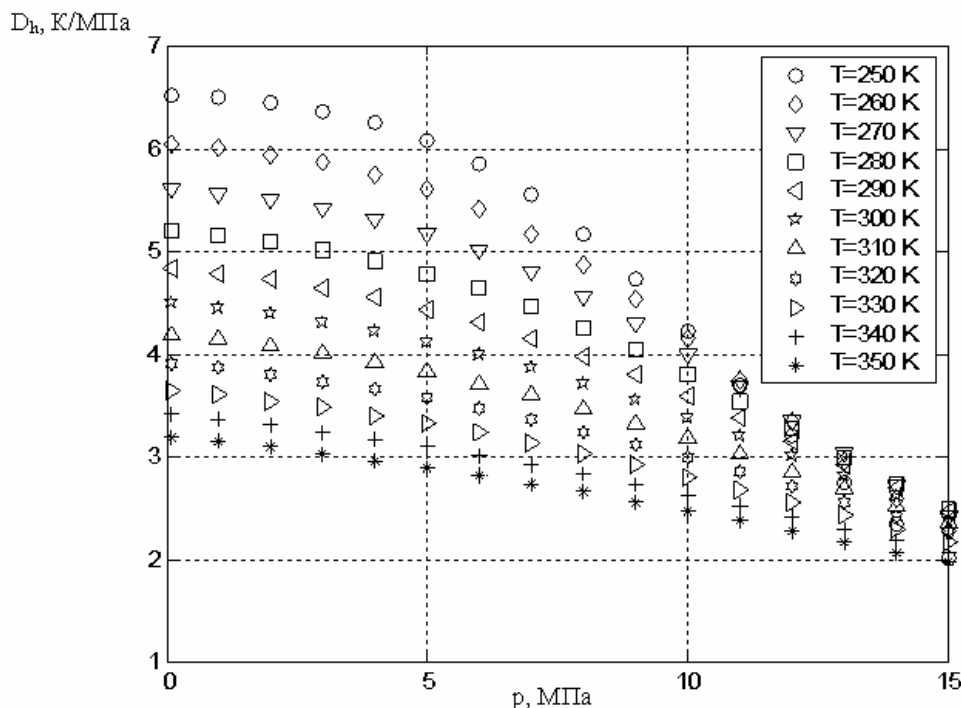


Рис. 2. Залежність коефіцієнта дроселювання від тиску та температури

Згідно із розробленою методикою розрахунок коефіцієнта Джоуля-Томсона виконують за таким рівнянням:

$$D_h = \sum_{i=1}^6 \left(\left[\sum_{j=1}^5 a_{ij} t^{5-j} \right] w^{6-i} \right), \quad (9)$$

де t – приведена температура; w – приведена густина; a_{ij} – коефіцієнти рівняння, значення яких наведені у таблиці.

a_{ij}	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	$j=5$
$i=1$	-67.802	446.76	-1102.4	1209.1	-498.87
$i=2$	143.8	-965.14	2433.4	-2736.8	1162.1
$i=3$	-113.04	775.41	-2001.9	2307.9	-1003.15
$i=4$	22.27	-158.22	420	-490.79	209.56
$i=5$	14.178	-95.204	241.87	-276.03	118.25
$i=6$	2.7783	-20.996	62.704	-90.622	56.442

Значення приведених температури t та густини w обчислюють відповідно за формулами

$$t = T / T_{ПК}, \quad (10)$$

$$w = r / r_{ПК}, \quad (11)$$

де T – термодинамічна температура природного газу, К; r – густина природного газу в робочих умовах, кг/м³.

Густину природного газу в робочих умовах знаходять за відомою залежністю

$$r = \frac{p \cdot T_{СТ}}{P_{СТ} \cdot T \cdot K} r_{СТ}, \quad (12)$$

де p – абсолютний тиск природного газу, МПа; K – коефіцієнт стисливості, який можна обчислити за спрощеними даними про склад газу для тиску газу до 12 МПа за методами NX19 мод., GERG91 мод. [5], ДССДД 4-2002 [10], а для тиску, більшому 12 МПа – тільки за методикою ДССДД 4-2002 [10]; $P_{СТ}$, $T_{СТ}$ – тиск та температура стандартних умов: $P_{СТ} = 0,101325$ МПа, $T_{СТ} = 293,15$ К.

Псевдокритичну температуру газу знаходять за формулою ГОСТ 30319.1-96 [5]

$$T_{ПК} = 88,25(0,9915 + 1,759r_{СТ} - x_y - 1,681x_a), \quad (13)$$

а псевдокритичну густину обчислюють за формулою, запропонованою в [11] для розрахунку цього параметра на основі спрощених даних про склад газу

$$r_{ПК} = 163,5 \cdot (r_{СТ} / 0,6682)^{0,6} + 62,62x_a + 163,359x_y. \quad (14)$$

У формулах (12)–(14) $r_{СТ}$ – густина природного газу за стандартних умов, кг/м³;

x_a – молярна частка азоту;

x_y – молярна частка вуглекислого газу.

Перевірка розробленої методики виконана щодо розрахункових значень коефіцієнта Джоуля-Томсона, отриманих за методом ISO 20765-1 [6] для природних газів, склад яких відповідає сертифікатам якості лабораторій ДК “Укртрансгаз” із різних регіонів, та для тестових сумішей із вмістом азоту та вуглекислого газу до 5% кожного. Нижче графічно показані три приклади перевірки у формі залежностей відносного відхилення значень методики d_{D_h} від тиску при фіксованих значеннях температури.

Значення відносного відхилення d_{D_h} у кожній точці отримані за формулою

$$d_{D_h} = \frac{D_{h,mem} - D_{h,ISO}}{D_{h,ISO}} \cdot 100\%, \quad (15)$$

де $D_{h,mem}$ – значення коефіцієнта дроселювання, обчислене за розробленою методикою; $D_{h,ISO}$ – значення коефіцієнта дроселювання за ISO 20765-1 [6].

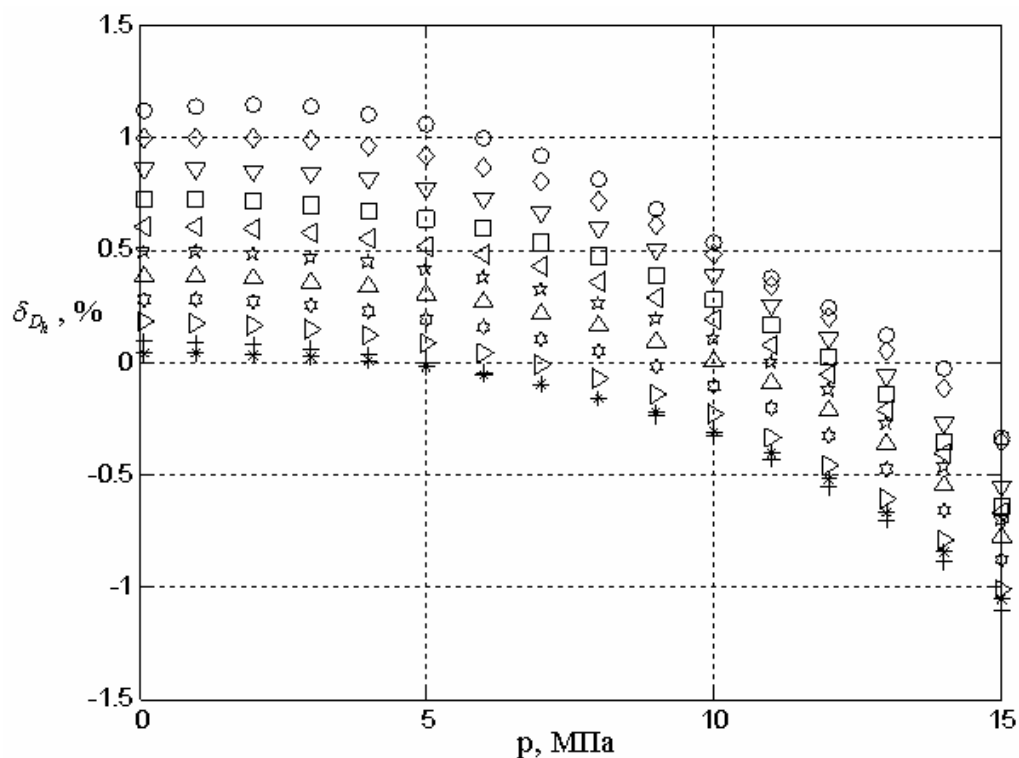


Рис. 3. Відносні відхилення значень методики від значень методу ISO 20765-1 для природного газу складу:
 $\Gamma_{CT}=0,68137$ кг/м³, $x_a=0,817\%$, $x_y=0,032\%$

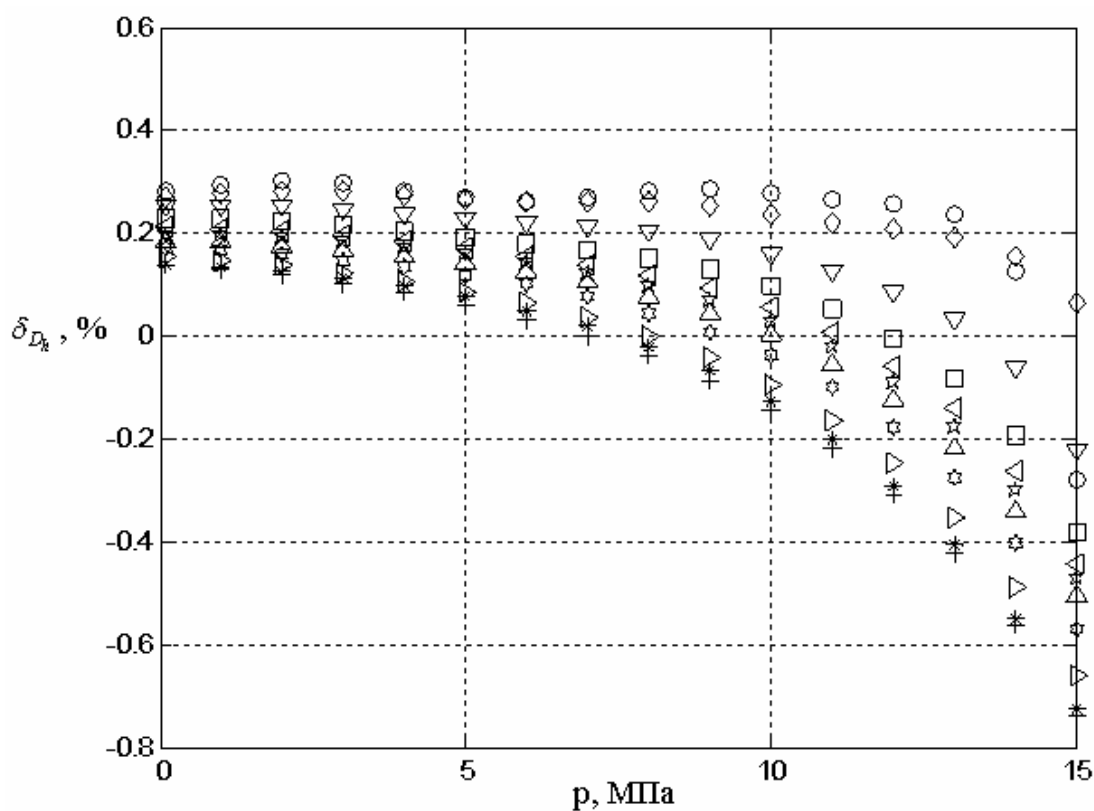


Рис. 4. Відносні відхилення значень методики від значень методу ISO 20765-1 для природного газу складу:
 $\Gamma_{CT}=0,70104$ кг/м³, $x_a=0,997\%$, $x_y=0,612\%$

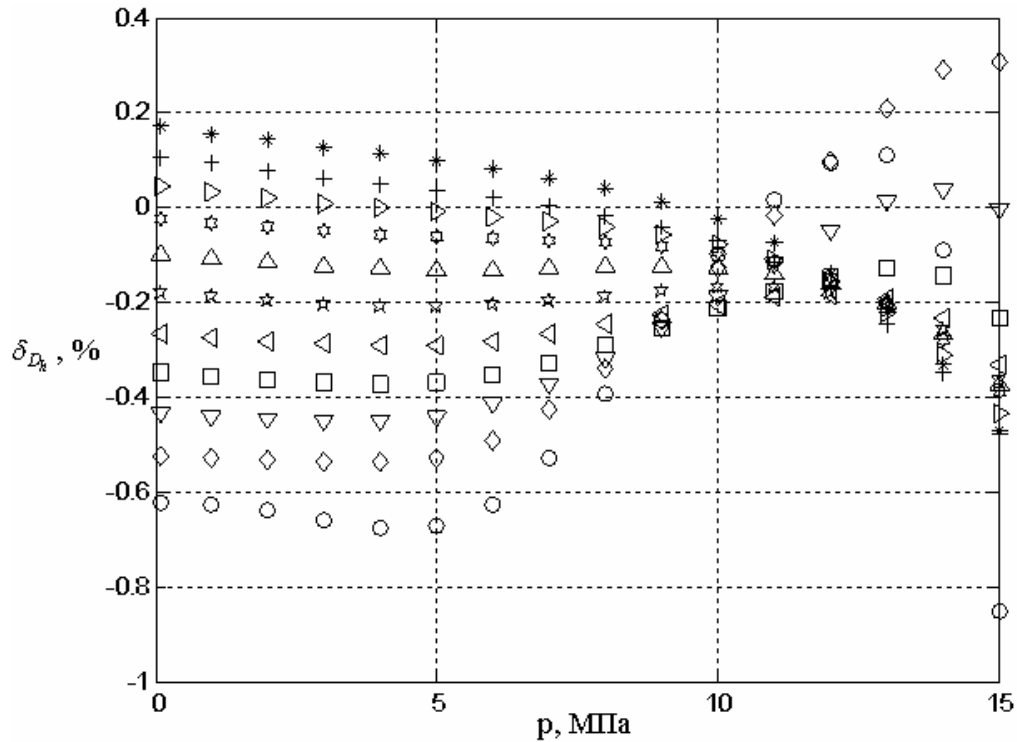


Рис. 5. Відносні відхилення значень методики від значень методу ISO 20765-1 для природного газу складу: $\Gamma_{CT}=0.7186 \text{ кг/м}^3$, $x_a=1,181\%$, $x_y=0,917\%$

Залежно від температури, для якої вони побудовані, криві $d_{D_h} = f(p)$ позначені на рис. 3–5 такими самими символами як і на рис 2.

Як очевидно із рис. 3–5, відносне відхилення значень методики від значень ISO 20765-1 не перевищує $\pm 1,5\%$ для природних газів, типового для української газотранспортної мережі складу. Детальне тестування методики показує, що для природних газів із густиною за стандартних умов $\Gamma_{CT} \leq 0,75 \text{ кг/м}^3$ та вмістом азоту та вуглекислого газу до 5 % кожного відносне відхилення d_{D_h} не перевищує $\pm 3,0\%$ для тиску від 0,1 Мпа до 15,0 Мпа та температури від 250 К до 350 К.

Висновки. Внаслідок дослідження математичної моделі процесу перетікання газу через пристрій звуження встановлено, що процес незворотного дроселювання газу (перетікання газу із області більшого тиску в область меншого тиску) є ізентальпійним за умови, що розглядаються два перерізи потоку з рівними швидкостями. Тобто застосовуючи рівняння інтегрального дросельного ефекту (6), можна визначити кінцеве зниження температури газу після відновлення параметрів потоку (тиску, температури) за діафрагмою. Багато дослідників приймають допущення, що довжина ділянки відновлення параметрів є меншою, ніж відстань від діафрагми до термоперетворювача. Однак для систем обліку, які працюють при значному відношенні перепаду тиску до тиску газу, це припущення може бути хибним. Адіабатне зниження температури газу у отворі тут може досягати $10 \text{ }^\circ\text{C}$ і більше [4], а довжина ділянки відновлення температури, на думку авторів, може бути більшою, ніж відстань до термоперетворювача.

Для обчислення коефіцієнта дроселювання можуть бути застосовані два методи сучасних нормативних документів: метод на основі запропонованої авторами формули (8) та рівняння стану ВНИЦ СМВ [5] та метод ISO 20765-1 [6]. Однак з погляду застосування у обчислювачах витрати обидва вказані методи мають деякі недоліки. Обидва методи реалізовані на основі рівнянь із взаємозалежними параметрами (Z, p) , (p, p) , які можуть бути розв'язані тільки ітераційно, що

збільшує обчислювальне навантаження процесорів у обчислювачах. Методи вимагають введення даних про повний компонентний склад газу, що вимагає перероблення програмного забезпечення сучасних обчислювачів, переважна більшість яких орієнтована на введення спрощених даних про склад газу.

Автори розробили нову методику для розрахунку коефіцієнта дроселювання за спрощеними даними про склад газу. Методика пропонується для обчислення коефіцієнта дроселювання природних газів із густиною за стандартних умов $r_{CT} \leq 0,75 \text{ кг/м}^3$ та вмістом азоту та вуглекислого газу до 5 % кожного. У вказаній області зміни складу газу відносно відхилення значень методики від значень ISO 20765-1 [6] не перевищує $\pm 3,0\%$ для діапазону тиску від 0,1 Мпа до 15,0 Мпа та температури від 250 К до 350 К. Методика пропонується для застосування в обчислювачах природного газу та для дослідження процесів дроселювання під час перетікання природного газу через пристрої звуження, регулятори тиску (редуктори) різних конструкцій.

1. ГОСТ 8.586.5-2005 Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч. 5. Методика выполнения измерений. 2. Пістун Є.П., Учитель І.Л. Сучасні проблеми обліку природного газу // Матеріали третьої 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. Ф. Матіко, І. Учитель. Моделювання температурного режиму газового потоку при його протіканні через пристрої звуження // Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація: Вісник Нац. Ун-ту “ЛП”. – 2003. – № 476. – С. 27–32. 5. ГОСТ 30319.0:3-96 Газ природный. Методы расчета физических свойств. – М.: Изд-во стандартов, 1996. 6. ISO 20765-1:2005. Natural gas – Calculation of thermodynamic properties. Part 1: Gas phase properties for transmission and distribution applications. 7. Поршаков Б.П., Бикчентай Р.Н., Романов Б.А. Термодинамика и теплопередача (в технологических процессах нефтяной и газовой промышленности): Учебник для вузов. – М.: Недра, 1987. – 349 с. 8. Беляев Н.М. Термодинамика. – К.: Вища школа, 1987. – 344 с. 9. Шпильрайн Э.Э., Кессельман П.М. Основы теории теплофизических свойств веществ. — М.: Энергия, 1977. – 180 с. 10. ДССДД 4-2002. Газ природний. Методика розрахунку коефіцієнта стисливості у діапазоні тиску 12 ... 25 Мпа // Є. Пістун, Ф. Матіко. Введ. 01.07.2002. – Київ: Держстандарт України, 2002. – 5 с. 11. ДССДД 8-2006. Газ природний. Методика розрахункового визначення показника адіабати в інтервалах тиску від 0.1 до 25 Мпа і температури від 250 до 320 К // Є. Пістун, Ф. Матіко. Введ. 01.07.2002. – К.: Держстандарт України, 2002. – 16 с.