

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЯКІСНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИРОДНОГО ГАЗУ НА ФУНКЦІОНУВАННЯ ПАРЦІАЛЬНОГО ВИТРАТОМІРА

© В.В.Малісевич, О.Є.Середюк

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Проаналізовано останні наукові дослідження у сфері витратометрії, що стосуються вимірювання витрати або об'єму природного газу з одночасним врахуванням якісних параметрів робочого середовища. Розроблено математичну модель функціонування парціального витратоміра на базі трубки Піто, яка передбачає врахування якісних параметрів робочого середовища. Досліджено вплив компонентного складу природного газу і його робочих параметрів на непостійність теплопровідності і теплоємності природного газу

Проанализированы последние научные исследования в области расходомерии, касающиеся измерения расхода или объема природного газа при одновременном учете качественных параметров рабочей среды. Разработана математическая модель функционирования парциального расходомера на базе трубки Пито, которая предусматривает учет качественных параметров рабочей среды. Исследовано влияние компонентного состава природного газа и его рабочих параметров на непостоянство теплопроводности и теплоемкости природного газа

The last scientific researches in the field of flow measurement, concerning measurements of flow rate or volume of natural gas at the simultaneous accounting of qualitative parameters of a working environment are analyzed. The mathematical model of partial flowmeter functioning on the basis of a Pitot tube which provides the accounting of working environments qualitative parameters is developed. Influence of natural gas blend composition and its working parameters on inconstancy of natural gas thermal conductivity and heat capacity is investigated

Постановка проблеми

При обліку природного газу все більшої актуальності набуває питання не тільки визначення його об'єму чи об'ємної витрати, але й цих параметрів у сукупності з енергетичними характеристиками природного газу, зокрема теплотворною здатністю. Як відомо, енергетичні характеристики природного газу визначаються не тільки його густиною, але і компонентним складом, який за однакової густини може по-різному впливати на теплотворну здатність палива. З урахуванням того, що у світовій практиці все в більших масштабах комерційний розрахунок за спожитий газ здійснюється з урахуванням його енергетичної цінності, в Україні актуалізується питання необхідності застосування нових підходів і вдосконалення відомих аспектів до вирішення питань з обліку природного газу, які сприяють вирішенню питань енергозбереження.

Поряд з цим доцільним є перевіряння метрологічних характеристик промислових лічильників газу впродовж міжпіврічного інтервалу, у зв'язку з чим актуальним є бездемонтажний контроль метрологічних характеристик лічильників безпосередньо на місці експлуатації. Водночас наявні пристрої, за допомогою яких на сьогоднішній день здійснюють контроль метрологічних характеристик промислових лічильників газу, не передбачають врахування якісних параметрів природного газу. Такий підхід не дає можливості переходу на нові методи обліку природного газу з врахуванням його енергетичних характеристик.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз останніх досліджень у сфері врахування якісних параметрів при витратометрії природного газу показав, що створені інформаційно-вимірювальні комплекси для вимірювання витрати або об'єму природного газу з одночасним врахуванням якісних параметрів (компонентного складу або густини), які визначають переважно хроматографічним методом або густиномірами [1].

Контроль якісних характеристик природного газу має практичну цінність для досягнення підвищення точності діагностування або експрес-контролю робочих засобів вимірювання із зведенням результатів вимірювання об'єму або об'ємної витрати природного газу до стандартних умов [2].

Водночас на сьогоднішній день є обмежена кількість засобів вимірювальної техніки, які би опосередкованим методом враховували якісні характеристики природного газу при його обліку. Відомі нормативні документи враховують якісні параметри природного газу перш за все для умов визначення його теплотворної здатності [3]. Нові наукові дослідження [4] стосуються розроблення алгоритму розрахунку коефіцієнта теплопровідності природного газу для вирішення питань теплообміну між потоком природного газу і зовнішнім середовищем і для вирішення задач підвищення точності обліку природного газу. Однак отримані алгоритми стосуються визначення теплопровідності метану від тиску за різних температур і практично відсутні дослідження впливу на теплопровідність з врахуванням його долі у природному газі.

Один із аспектів необхідності дослідження впливу якісних параметрів природного газу на його теплофізичні характеристики полягає у обґрунтуванні можливості застосування парціальних витратомірів природного газу вдосконаленої конструкції на базі трубки Піто. Розроблений авторами витратомір [5] передбачає вимірювання витрати природного газу з корекцією щодо його теплопровідності, що забезпечує можливість вимірювання енергетичної цінності природного газу. Цей витратомір містить закріплену на трубопроводі з робочим середовищем напірну трубку з приймачами повного і статичного тиску і блоком вимірювання витрати, який у своєму складі, на відміну від відомих, містить термочутливий давач, блок вимірювання температури і блок визначення теплопровідності природного газу. Використання в парціальному витратомірі термочутливого давача з блоком для визначення теплопровідності природного газу з врахуванням температури і локальної швидкості робочого середовища дає змогу визначати теплопровідність робочого середовища. Розміщення напірної трубки і термочутливого давача на одній осі вздовж трубопроводу дає можливість визначати не тільки витрату робочого середовища, але і здійснювати коригування на його енергетичну цінність, наприклад, з врахуванням термодинамічних властивостей, зокрема, теплопровідності природного газу.

Мета роботи

Метою роботи є розроблення технічного забезпечення і математичного обґрунтування при створенні витратомірів і лічильників, які би функціонували з врахуванням якісних параметрів робочого середовища.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для практичної реалізації парціального витратоміра природного газу необхідно розробити математичну модель його функціонування, яка враховує ряд якісних параметрів робочого середовища.

Термочутливим елементом парціального витратоміра є тонка коротка металева дротина, що нагрівається електричним струмом.

Кількість тепла Q , яке виділяє електричний струм, при проходженні через дротину, становить:

$$Q = I^2 R_{\bar{A}}, \quad (1)$$

де I – сила електричного струму; $R_{\bar{A}}$ – активний електричний опір дротини.

Кількість тепла Q , яке переноситься за одиницю часу від дротини довжиною l з рівномірно розподіленою температурою до робочого середовища, рівна [6]:

$$Q = \alpha \pi d l (T_{\bar{A}} - T_{\bar{A}}), \quad (2)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); d – діаметр дротини; l – довжина дротини; $T_{\bar{A}}$, $T_{\bar{A}}$ – температура дротини і газу відповідно.

За умови функціонування парціального витратоміра [5] кількість тепла, яке виділяється на дротині, повинна бути рівною кількості тепла, що передається до робочого середовища:

$$I^2 R_{\bar{A}} = \alpha \pi d l (T_{\bar{A}} - T_{\bar{A}}). \quad (3)$$

Завдяки теплопровідності, вільній та вимушеній конвекції та випромінюванню дротина охолоджується. Впливом випромінювання і вільної конвекції при вимірюванні витрати газу за умов турбулентного режиму течії можна знехтувати [6].

Для визначення коефіцієнта α скористаємося критерієм Нусельта Nu [6]:

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{\bar{A}}}{d}, \quad (4)$$

де $\lambda_{\bar{A}}$ – коефіцієнт теплопровідності газу при його температурі $T_{\bar{A}}$.

Описати процес теплообміну циліндра з газовим середовищем, що рухається перпендикулярно до його осі, можна на базі емпіричної залежності, виведеної Крамерсом [7]:

$$\text{Nu} = 0,42 \text{Pr}^{0,2} + 0,57 \text{Pr}^{0,33} \text{Re}^{0,5}, \quad (5)$$

де $\text{Pr} = \frac{c_p \mu_{\bar{A}}}{\lambda_{\bar{A}}}$ – критерій Прандтля; $\text{Re} = \frac{\rho_{\bar{A}} v d}{\mu_{\bar{A}}}$ – критерій Рейнольдса.

У виразах для критеріїв Pr і Re використано позначення: c_p – питома теплоємність газу при постійному тиску; $\mu_{\bar{A}}$ – коефіцієнт динамічної в'язкості газу при температурі $T_{\bar{A}}$; $\rho_{\bar{A}}$ – густина газу при температурі $T_{\bar{A}}$; v – швидкість газу.

Після підстановки (4) і (5) в (3) отримуємо:

$$I^2 R_{\bar{A}} = \pi l \lambda_{\bar{A}} (T_{\bar{A}} - T_{\bar{A}}) (0,42 \text{Pr}^{0,2} + 0,57 \text{Pr}^{0,33} \text{Re}^{0,5}). \quad (6)$$

Це рівняння описує функціонування термоанемометричного перетворювача, що входить до складу парціального витратоміра. Враховуючи, що до його складу входить також трубка Піто, функціонування якої можна описати за відомою формулою:

$$\Delta p = \frac{\rho_{\bar{A}} v^2}{2}, \quad (7)$$

де Δp – різниця між динамічним і статичним тиском на трубці Піто.

Виразивши з рівняння (7) парціальну швидкість потоку v і підставивши вираз для неї у (6) отримаємо таку математичну модель функціонування парціального витратоміра:

$$I^2 R_{\bar{A}} = \pi l \lambda_{\bar{A}} (T_{\bar{A}} - T_{\bar{A}}) \left(0,42 \text{Pr}^{0,2} + 0,57 \text{Pr}^{0,33} \left(\frac{(2 \Delta p \rho_{\bar{A}})^{0,5} d}{\mu_{\bar{A}}} \right)^{0,5} \right). \quad (8)$$

З отриманого рівняння видно, що на результати вимірювання витрати впливають теплофізичні характеристики робочого середовища $\lambda_{\bar{A}}$ і c_p , а також фізичні параметри природного газу: $\rho_{\bar{A}}$ і $\mu_{\bar{A}}$ (останнє входить у критерій Pr).

В процесі функціонування парціального витратоміра непостійність вказаних теплофізичних характеристик робочого середовища будуть впливати на результати вимірювання, що потребує проведення кількісного дослідження їх зміни.

Враховуючи те, що дані про теплопровідність природного газу як суміші його складових в довідковій літературі відсутні, то здійснимо моделювання зміни термодинамічних параметрів газу за різних умов експлуатації витратоміра. Моделювання проводилося для діапазону робочих тисків (0,1-2,0) МПа з кроком 0,1 МПа і фіксованих значень температури 0, 10 і 20 °С з урахуванням зміни компонентного складу природного газу. За основу при моделюванні вибраний такий склад газу, який містить за об'ємом 93 % метану, 3,3 % етану, 1,8 % пропану, 1,5 % азоту та 0,4 % вуглекислого газу. В процесі моделювання змінювався вміст метану в діапазоні (89-97) %, етану (0-6,6) %, пропану (0-3) %, азоту (0-3) %, вуглекислого газу (0-0,8) %. При зміні вмісту кожного з компонентів вміст решти складових пропорційно збільшувався або зменшувався для досягнення суми 100 %.

Теплопровідність природного газу розраховувалася як теплопровідність суміші газів, що входять до його складу. Для цього застосовувалося рівняння [8]:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \lambda_i}{\sum_{j=1}^n y_j A_{ij}}, \quad (9)$$

де λ , λ_i – теплопровідність природного газу і його i -тих компонент відповідно; Y_i , Y_j – мольні долі i -их і j -их компонентів, яким відповідно присвоюються вказані індекси і які розраховувалися відповідно до заданих об'ємних концентрацій газу.

Параметр A_{ij} для формули (9) розраховувався наступним чином [8]:

$$A_{ij} = \frac{\left(1 + (\lambda_i / \lambda_j)^{1/2} (M_i / M_j)^{1/4}\right)^2}{\left(8 \cdot (1 + M_i / M_j)\right)^{1/2}}, \quad (10)$$

де M_i , M_j – молекулярна маса i -их та j -их компонентів.

Мольні долі компонентів розраховувалися відповідно до заданих об'ємних концентрацій газу за формулою [3]:

$$y_i = \frac{r_i / z_{ci}}{\sum_i (r_i / z_{ci})}, \quad (11)$$

де r_i – об'ємна частка i -го компонента; z_{ci} – фактор стисливості i -го компонента газу за стандартних умов, який розраховується згідно із [3].

Числові значення теплопровідності λ_i компонентів природного газу визначалися з [9] із застосуванням методу інтерполяції.

Результати моделювання наведено на рис.1. Вони відображають зміну теплопровідності природного газу в функціональній залежності від вмісту в ньому метану для модельованого діапазону робочих тисків (0,1-2,0) МПа та фіксованих температурах 0 °С (а), 10 °С (б) і 20 °С (в). З графіків є очевидним неоднозначний характер зміни теплопровідності від зміни компонентного складу газу і робочого тиску, що в найбільшій мірі має місце при температурі 0 °С. Так при зростанні вмісту метану за низьких тисків (близько 0,1-0,3 МПа) робочого середовища теплопровідність зростає з $27,96 \cdot 10^3$ до $29,75 \cdot 10^3$ Вт/(м·К), а при великих тисках (близько 2,0 МПа) за цих же умов зростання вмісту метану спадає з $34,07 \cdot 10^3$ до $32,77 \cdot 10^3$ Вт/(м·К) (рис. 1,а). Цей характер зміни теплопровідності практично є аналогічним і за температур 10 і 20 °С, однак із зростанням тиску і одночасним зростанням температури ця зміна кількісно стає меншою при 10 °С (рис. 1,б), а при 20 °С теплопровідність, навіть дещо зростає з $34,67 \cdot 10^3$ до $34,76 \cdot 10^3$ Вт/(м·К). Також за результатами моделювання, використовуючи отримані графіки, можна виділити ділянки, де теплопровідність несуттєво змінюється від впливу компонентного складу природного газу за певних значень його температури і тиску. Це свідчить про можливість вибору оптимізаційних характеристик щодо умов експлуатації розробленого парціального витратоміра.

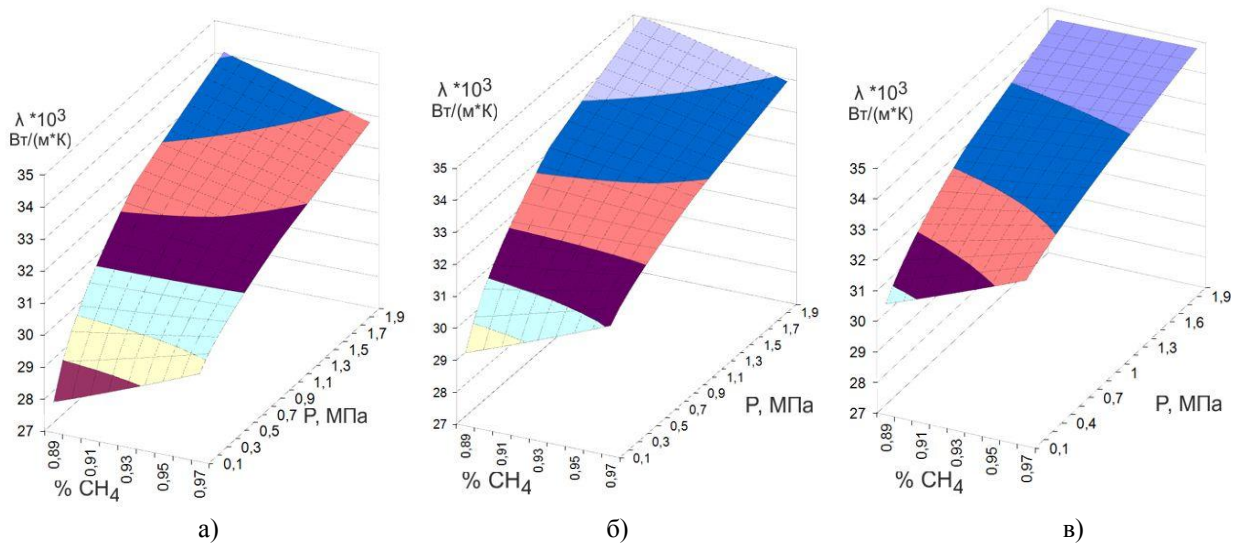


Рисунок 1 – Графічна залежність зміни теплопровідності природного газу від концентрації в ньому метану в межах (89-97) % для діапазону тиску (0,1-2,0) МПа при температурах 0 °С (а), 10 °С (б) і 20 °С (в)

Теплоємність природного газу розраховувалася шляхом адитивності з урахуванням теплоємностей кожного із компонентів газу і їх об'ємних долей. Числові значення теплоємності кожного з компонентів взято з [10, 11].

Результати моделювання, які наведені на рис. 2, свідчать про однаковий вид закономірностей впливу компонентного складу природного газу і його фізичних параметрів (тиску і температури) на зміну теплоємності газу. При цьому теплоємність зростає із зростанням вмісту метану і із зростанням тиску і температури природного газу. Незважаючи на те, що ці закономірності в цілому є достатньо відомим, однак результати моделювання дозволяють кількісно оцінити ступінь впливу компонентного складу і робочих параметрів газу на його теплоємність.

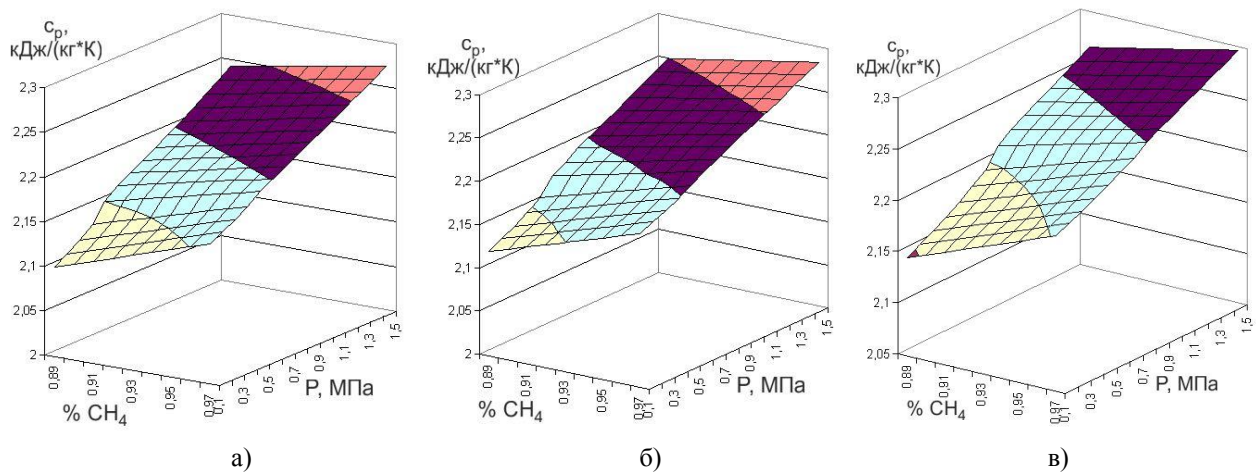


Рисунок 2 – Графічна залежність зміни теплоємності природного газу від концентрації в ньому метану в межах (89-97) % для діапазону тиску (0,1-1,5) МПа при температурах 0 °С (а), 10 °С (б) і 20 °С (в)

Закономірності зміни густини і динамічної в'язкості природного газу, які враховує розроблена модель парціального витратоміра, описуються відомими алгоритмами [3] і можуть бути використані безпосереднім чином при створенні алгоритму роботи досліджуваного парціального витратоміра.

Отримані результати моделювання є необхідними при створенні математичної моделі парціального витратоміра нової конструкції [5] та обґрунтовують доцільність їх застосування з коригуванням щодо якісних параметрів природного газу.

Висновки

Розроблена математична модель функціонування парціального витратоміра з корекцією щодо якісних параметрів природного газу.

Проведено числове моделювання впливу компонентного складу природного газу і його робочих параметрів на непостійність теплопровідності і теплоємності природного газу.

Отримані результати проведених досліджень обґрунтовують можливість створення парціальних витратомірів, які дозволяють визначати витрату природного газу як енергоносія, тобто з урахуванням енергетичної цінності вимірюваних потоків газу.

1. *Облік природного газу: довідник / М.П.Андрійшин, О.М.Карпаш, О.Є.Середюк [та ін.]; за ред. С.А.Чеховського. – Івано-Франківськ: ПП «Сімик», 2008. – 180 с.*

2. *Малісевич В.В. Моделювання впливу густини і компонентного складу природного газу при діагностуванні засобів його обліку / В.В. Малісевич, О.Є. Середюк // Методи та прилади контролю якості. – 2011. – №27. – С.56–62.*

3. *Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки: ГОСТ 30319.1-96. – [Введен с 1997-07-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1997.–14 с.*

4. *Матіко Ф.Д. Алгоритм розрахунку теплопровідності природного газу / Ф.Д. Матіко, Р.М. Федоришин // Методи та прилади контролю якості. – 2007. – №18. – С.64-67.*

5. *Пат. 99887 С2 Україна, МПК (2012.01) G 01 F 1/00. Парціальний витратомір / Середюк О.Є., Малісевич В.В. – №а 201114278; заявл. 02.12.11; опубл. 10.10.12, Бюл. № 19.*

6. *Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник / П.П. Кремлевский. – Л.: Машиностроение, 1989. – 701 с.*

7. *Крейт Ф. Основы теплопередачи: Пер. с англ. / Ф. Крейт, У. Блек. – М.: Мир, 1983. – 512 с.*

8. *Рид Р. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд: Пер. с англ.: под ред. Б.И. Соколова. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.*

9. *Справочник по теплопроводности жидкостей и газов / Н.Б. Варгафтик, Л.П. Филиппов, А.А. Тарзиманов [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.*

10. *Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 720 с.*

11. *Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов / В.С. Чиркин. – М.: Госуд. изд-во физико-матем. литературы, 1959. – 356 с.*