

Математичне моделювання температурного режиму потоку газу в системах його обліку при імпульсних режимах роботи

Роман Федоришин, Олександр Комарецький, Мар'ян Чура

Кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів,
Національний університет "Львівська політехніка",
УКРАЇНА, м. Львів, вул. С. Бандери, 12,
E-mail: romanfedoryshyn@yahoo.com

Abstract – The mathematical model of the temperature regime of gas flow in a metering system is built based on the law of conservation of energy. Using the developed model the transient processes are simulated and compared to the results of experimental studies. On the basis of verification of the developed model it was defined that the maximum absolute deviation of the simulated values from the experimental results was 0.73 °C. The developed model provides the possibility to define the systematic error of natural gas flow temperature measurement caused by inertia of the thermometer in pulse regimes of flow. The pulse regime of flow is present in natural gas metering systems installed in boiler houses where the switching on and off of the boiler leads to the pulse regime of gas consumption. Ways to define and eliminate the systematic error of flow temperature measurement caused by inertia of the thermometer in pulse regimes of flow are proposed in this paper in order to improve the accuracy of natural gas metering.

Ключові слова – природний газ, вимірювання, похибка, математична модель, температура, імпульсний режим.

I. Вступ

У зв'язку із зростанням цін на енергоносії, в тому числі на природний газ, в нашій державі стали першочерговими завдання впровадження енергозберігаючих технологій та економного використання енергоносіїв. Відомо, що ці завдання можуть бути вирішені тільки при умові налагодження точного обліку енергоносіїв.

Вимірювання витрати та кількості природного газу може бути здійснене за допомогою різних методів. У склад систем вимірювання крім основного пристрою (лічильника газу), як правило, входять вимірювальні перетворювачі температури і тиску газу, а також мікропроцесорний обчислювач (коректор) для зведення об'єму газу до стандартних умов.

Негативним фактором, що впливає на точність обліку природного газу є виникнення додаткових похибок вимірювання температури газу [1]. Ці похибки виникають внаслідок різниці температур газу та навколишнього середовища, а також внаслідок коливань температури та витрати газу.

Визначення та усунення систематичних похибок вимірювання температури газу в системах його обліку є важливим кроком для підвищення точності вимірювання витрати і кількості газу та для зменшення дисбалансів у системах транспортування та постачання природного газу. У цій роботі виконано моделювання температурного режиму потоку газу для визначення похибки вимірювання температури газу, зумовленої інерційністю термоперетворювача в перехідних режимах роботи. Виконано порівняння результатів

моделювання із результатами експериментальних досліджень, а також запропоновано шляхи зменшення похибок вимірювання температури та об'єму газу, зумовлених інерційністю термоперетворювача.

II. Особливості обліку газу у змінних температурних умовах роботи

В умовах роботи, коли має місце зміна (коливання) температури потоку газу може виникати додаткова систематична похибка вимірювання температури, зумовлена інерційністю термоперетворювача. Такі умови можуть виникати на автоматизованих газорозподільних станціях (АГРС) у системах обліку, встановлених після систем підігріву, що працюють за позиційним законом та у системах обліку, встановлених після регуляторів тиску в перехідних режимах роботи. Також такі умови можуть виникати на котельнях, де система обліку природного газу встановлена перед водогрійним котлом, що працює в імпульсному режимі.

Коли витрата газу в трубопроводі рівна нулю, температура газу в рівноважному стані дорівнює температурі навколишнього повітря в приміщенні котельні. Вмикання водогрійного котла (чи іншої системи, що споживає газ) приводить до раптового зростання витрати газу до деякого номінального значення. При цьому температура потоку газу поступово змінюється і досягає певного усталеного значення після завершення перехідного процесу. Температура потоку газу в місці встановлення вузла обліку залежить від температури, з якою газ поступає зовні в приміщення, від витрати газу, температури навколишнього повітря (в приміщенні котельні) та від конструктивних розмірів вузла обліку.

Під час динамічної зміни температури потоку газу виміряне значення термоперетворювачем буде дещо відрізнятися від дійсної температури внаслідок інерційності. Різниця між вимірним значенням температури та дійсною температурою потоку в перехідних режимах називається похибкою, зумовленою інерційністю термоперетворювача (ΔT_{in}). Наявність похибки (ΔT_{in}) приводить до виникнення відповідної похибки вимірювання витрати (ΔF) та похибки вимірювання об'єму газу (ΔV).

III. Побудова математичної моделі температурного режиму потоку газу

Математичну модель температурного режиму потоку газу будемо будувати на основі закону збереження тепла та рівняння витрати газу для довгого трубопроводу з турбулентним режимом протікання. Схема трубопроводу для отримання математичної моделі показана на Рис.1.

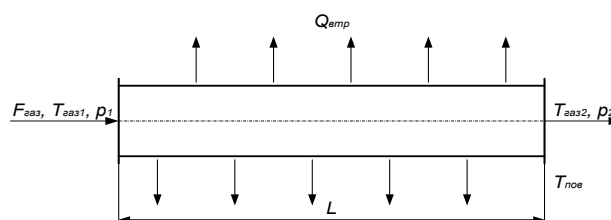


Рис. 1. Схема трубопроводу для отримання математичної моделі температурного режиму потоку газу

Рівняння збереження тепла для газу, що протікає на ділянці трубопроводу перед системою обліку буде мати вигляд:

$$\frac{dq_T}{dt} = Q_{BX} - Q_{ВИХ} - Q_{ВТР}, \quad (1)$$

де q_T – кількість тепла в газі, що знаходиться у трубопроводі (Дж); Q_{BX} – кількість тепла, що поступає з газом на вході трубопроводу (Дж/с); $Q_{ВИХ}$ – кількість тепла, що виходить з газом на виході трубопроводу (Дж/с); $Q_{ВТР}$ – кількість тепла, що втрачається від потоку газу до навколишнього середовища через стінку трубопроводу (Вт).

Кількість тепла в газі, що знаходиться у трубопроводі, визначається за рівнянням:

$$q_T = m_{газ} \cdot c_{p,газ} \cdot T_{газ}, \quad (2)$$

де $m_{газ}$ – маса газу, що знаходиться в трубопроводі; $c_{p,газ}$ – питома теплоємність газу; $T_{газ}$ – температура газу на вимірювальній ділянці трубопроводу.

Кількість тепла, що поступає з газом на вході трубопроводу:

$$Q_{BX} = F_{mгаз} \cdot c_{p,газ} \cdot T_{газ1}, \quad (3)$$

де $F_{mгаз}$ – масова витрата газу; $T_{газ1}$ – температура газу на вході трубопроводу.

Кількість тепла, що виходить з газом на виході трубопроводу:

$$Q_{ВИХ} = F_{mгаз} \cdot c_{p,газ} \cdot T_{газ2}, \quad (4)$$

де $T_{газ2}$ – температура газу на виході трубопроводу.

Кількість тепла, що втрачається від потоку газу до навколишнього середовища через стінку трубопроводу:

$$Q_{ВТР} = K_L \cdot L \cdot (T_{газ} - T_{ноє}), \quad (5)$$

де K_L – лінійний коефіцієнт теплопередачі від потоку газу до навколишнього повітря; L – довжина трубопроводу; $T_{ноє}$ – температура навколишнього повітря.

Розрахунок лінійного коефіцієнта теплопередачі від потоку газу до навколишнього повітря K_L виконується відповідно до [2].

Прийmemo, що густина газу по довжині трубопроводу під час моделювання не змінюється. Тоді об'ємна витрата газу в трубопроводі ($F_{газ}$) може бути описана рівнянням:

$$A \cdot \frac{dF_{газ}}{dt} + F_{газ}^2 = k^2 \cdot \frac{p_1 - p_2}{\rho_{газ}}, \quad (6)$$

де A , k – коефіцієнти, що враховують конструктивні розміри трубопроводу; $\rho_{газ}$ – густина газу за робочих умов; p_1 – тиск газу на вході трубопроводу; p_2 – тиск газу на виході трубопроводу; $F_{газ}$ – витрата газу за робочих умов.

Прийmemo, що температура газу в трубопроводі рівна температурі газу на виході трубопроводу ($T_{газ} = T_{газ2}$).

Звівши рівняння (1) - (6) отримаємо математичну модель температурного режиму газу в трубопроводі у вигляді такої системи диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} m_{газ} \cdot c_{p,газ} \cdot \frac{dT_{газ2}}{dt} = T_{газ1} \cdot c_{p,газ} \cdot F_{газ} \cdot \rho_{газ} - \\ - T_{газ2} \cdot c_{p,газ} \cdot F_{газ} \cdot \rho_{газ} - \\ - K_L \cdot L \cdot (T_{газ2} - T_{ноє}); \\ A \cdot \frac{dF_{газ}}{dt} + F_{газ}^2 = k^2 \cdot \frac{p_1 - p_2}{\rho_{газ}}. \end{cases} \quad (8)$$

Моделювання температурного режиму газу будемо здійснювати для вимірювальної ділянки трубопроводу і будемо вважати, що газ поступає з надвору в приміщення котельні з температурою $T_{газ1}$ і тиском p_1 , а температура $T_{газ2}$ і тиск p_2 – це виміряні значення температури і тиску газу на вузлі обліку газу (Рис.2).

Під час моделювання будемо вважати, що температура $T_{газ2}$ змінюється із транспортним запізненням, яке визначається за формулою:

$$\tau = \frac{V}{F_{газ}} = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot L}{F_{газ}}, \quad (9)$$

де V – об'єм газу, який знаходиться у трубопроводі на ділянці довжиною L .

Для розрахунку температури газу $T_{газ1}$ застосуємо рівняння Шухова [3]:

$$T_{газ1} = T_{ноє} + (T_{газ2} - T_{ноє}) \cdot e^{\frac{K_L \cdot L}{F_{газ} \cdot \rho_{газ} \cdot c_{p,газ}}}. \quad (10)$$

Значення тиску p_1 розрахуємо на основі втрат тиску при протіканні газу трубопроводом за рівнянням [4]:

$$p_1 - p_2 = \frac{\lambda \cdot L \cdot \rho_{газ} \cdot \omega^2}{2 \cdot D}, \quad (11)$$

де λ – коефіцієнт гідравлічного тертя; D – внутрішній діаметр трубопроводу; ω – середня швидкість руху середовища в трубопроводі.

Коефіцієнт гідравлічного тертя у вимірювальному трубопроводі визначимо з рівняння Колбрука-Уайта [5]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,74 - 2 \cdot \lg \left(\frac{2k}{D} + \frac{18,7}{Re_D \sqrt{\lambda}} \right), \quad (12)$$

де k – еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу; Re_D – число Рейнольдса для газу в трубопроводі.

Отримана математична модель температурного режиму газу в трубопроводі у вигляді рівнянь (8)-(12) пов'язує витрату та температуру газу на виході трубопроводу з конструктивними розмірами трубопроводу та параметрами потоку газу.

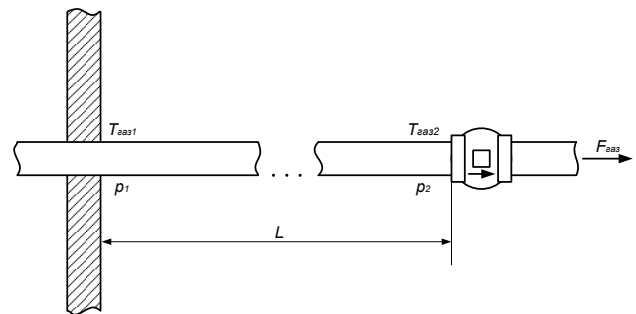


Рис. 2. Схема трубопроводу із вузлом обліку газу

IV. Моделювання температурного режиму та порівняння з результатами експериментального дослідження

Експериментальне дослідження температурного режиму потоку газу було виконано на установці з роторним лічильником, через який пропускали повітря в імпульсному режимі. Параметри установки наведені у Табл. 1.

ТАБЛИЦЯ 1

ПАРАМЕТРИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Назва параметра	Значення
Тип середовища	повітря
Абсолютний тиск, кПа	103
Витрата, приведена до стандартних умов, м ³ /год	10,78
Температура навколишнього повітря, °С	18,42
Внутрішній діаметр трубопроводу, мм	40

ТАБЛИЦЯ 2

ПАРАМЕТРИ ВУЗЛА ОБЛІКУ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Назва параметра	Значення
Тип середовища	природний газ
Абсолютний тиск газу, кПа	380
Температура газу, °С	+19,04
Витрата, приведена до стандартних умов, м ³ /год	110,00
Температура повітря в приміщенні котельні, °С	+28
Внутрішній діаметр трубопроводу, мм	80

Отримані експериментальні дані були застосовані для перевірки побудованої математичної моделі температурного режиму потоку газу в трубопроводі. На вхід моделі подали імпульсний сигнал зміни витрати повітря згідно експериментальних даних, а на виході моделі додано функцію передачі термоперетворювача опору у вигляді аперіодичної ланки першого порядку.

Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними представлено у графічній формі на Рис.3.

Максимальне абсолютне відхилення змодельованих значень від експериментальних даних становить 0,73 °С, а максимальне відносне відхилення становить 0,25 %.

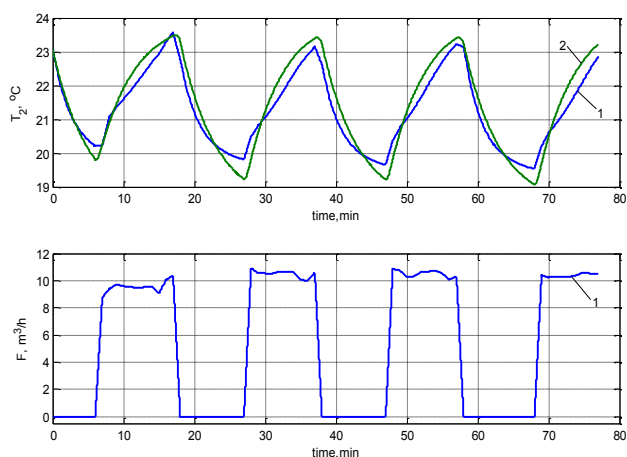


Рис. 3. Зміна температури $T_{газ2}$ при імпульсній зміні витрати повітря F : 1 – експериментальні дані; 2 – змодельовані значення

З отриманих результатів видно, що розроблена математична модель адекватно описує температурний режим потоку газу в трубопроводі.

V. Дослідження похибки ΔT_{in} для діючого вузла обліку природного газу

На основі отриманої математичної моделі температурного режиму потоку газу виконано моделювання похибки вимірювання температури газу, зумовленої інерційністю термоперетворювача (ΔT_{in}). Моделювання здійснено для вузла обліку природного газу на базі роторного лічильника КВР-1 з параметрами, наведеними у Табл.2. Цей вузол обліку встановлений у приміщенні котельні і на ньому має місце імпульсний режим протікання газу, що спричинене режимом споживання газу водогрійним котлом.

Для моделювання імпульсного режиму потоку газу застосовано структурну схему в середовищі SIMULINK, у якій реалізовано розроблену математичну модель.

На вхід моделі подали імпульсний сигнал зміни витрати газу, приведеної до стандартних умов, з амплітудою 110 м³/год. Період та тривалість імпульсів становлять 15 хв. Стала часу термоперетворювача становить 1 хв.

Результати моделювання зображені у вигляді графіків на Рис.4, 5.

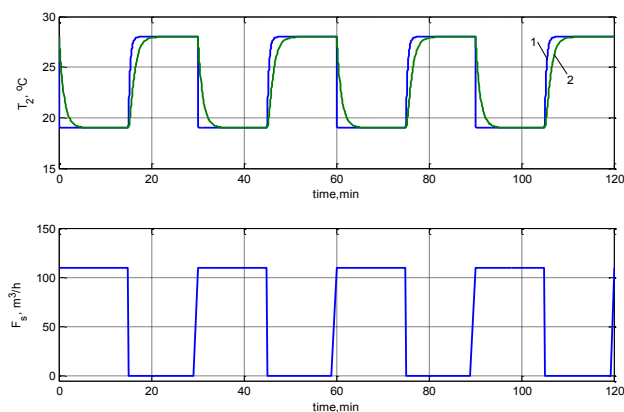


Рис. 4. Зміна витрати та температури газу:
1 – дійсне значення температури газу;
2 – виміряне значення температури газу

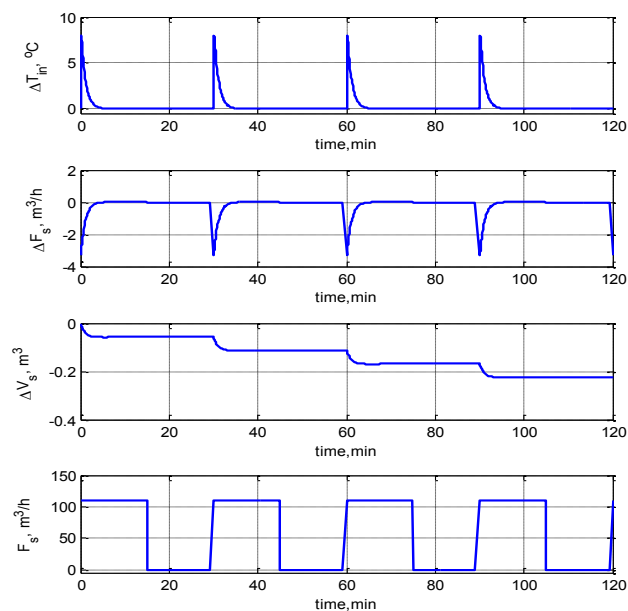


Рис. 5. Зміна витрати газу та похибок ΔT_{in} , ΔF_c , та ΔV_c

На Рис.5 ΔF_c та ΔV_c – це абсолютні похибки вимірювання відповідно витрати та об'єму газу, зумовлені інерційністю термоперетворювача в перехідних режимах роботи.

З результатів моделювання видно, що при імпульсних режимах роботи вузла обліку в умовах, коли температура потоку газу є нижчою за температуру навколишнього повітря ($T_{газ} < T_{нов}$), похибка $\Delta T_{ін}$ є додатною, а похибки ΔF_c та ΔV_c – від'ємними. Це означає, що на вузлі обліку газу має місце заниження вимірюваного об'єму спожитого газу.

З результатів моделювання видно, що виміряне значення об'єму газу за 2 години є занижене на $0,22 \text{ м}^3$, а за добу – на $2,67 \text{ м}^3$. В тому випадку, коли період та тривалість імпульсів витрати газу буде не 15 хв, а 10 хв, заниження буде становити $4,10 \text{ м}^3$ на добу, а коли стала часу термоперетворювача буде не 1 хв, а 1,5 хв (при періоді та тривалості імпульсів витрати газу 15 хв) заниження буде становити $4,01 \text{ м}^3$ на добу. Коли тривалість імпульсів витрати газу буде 10 хв, а стала часу термоперетворювача буде рівна 1,5 хв заниження вимірюваного об'єму буде становити $6,09 \text{ м}^3$ на добу.

Висновок

Розроблено математичну модель температурного режиму потоку газу на вимірювальній ділянці, яка враховує конструктивні характеристики вузла обліку газу та параметри потоку газу, що дає можливість виконувати моделювання дійсної та виміряної температури газу на вузлі обліку в перехідних режимах роботи. Виконано порівняння результатів моделювання із експериментальними даними для установки з роторним лічильником, через який протікало повітря. Максимальне абсолютне відхилення результатів моделювання від експериментальних даних становить $0,73 \text{ }^\circ\text{C}$.

На основі розробленої моделі визначено похибку вимірювання об'єму газу, зумовлену інерційністю термоперетворювача при імпульсних режимах протікання газу, для діючого вузла обліку природного газу на базі роторного лічильника. В умовах, коли температура потоку газу є вищою за температуру навколишнього повітря ($T_{газ} > T_{нов}$), ця похибка є додатною, а коли $T_{газ} < T_{нов}$ – від'ємною. Величина похибки залежить від показника теплової інерції

термоперетворювача, періоду (частоти) імпульсів витрати газу, температури і витрати газу та температури навколишнього повітря. Для аналізованого вузла обліку природного газу величина цієї похибки може становити 6 м^3 за добу.

Мінімізувати похибку вимірювання об'єму газу, зумовлену інерційністю термоперетворювача при імпульсних режимах протікання газу, можна шляхом встановлення низькоінерційних термоперетворювачів безпосередньо в потік газу, а також шляхом встановлення вузлів обліку газу в умовах, коли температура потоку газу рівна температурі навколишнього повітря.

Запропонований спосіб визначення та мінімізації похибок вимірювання температури та об'єму газу, зумовлених інерційністю термоперетворювача при імпульсних режимах протікання газу, забезпечить підвищення точності обліку природного газу та зменшення дисбалансів у системах транспортування та постачання природного газу.

References

- [1] F. D. Matiko and R. M. Fedoryshyn, "Doslidzhennya vplyvu temperaturnoho rezhymu potoku pryrodnoho hasu na tochnist' vymiryuvannya yoho vytraty metodom zminnoho perepadu tyskiv" ["Study of influence of temperature regime of natural gas on the accuracy of flow rate measurement by means of the differential pressure method"], Visnyk NU "LP" – Proceeding of Lviv Polytechnic National University, no. 574, pp. 29-38, 2007.
- [2] V. Y. Labay, Teplomasoobmin: Pidruchnyk dlya VNZ [Heat and mass exchange: handbook for higher educational institutions]. Lviv: Triada Plus Publ., 2004.
- [3] B. L. Krivoshein, Teplofizicheskie raschety gazoprovodov [Heat and physical design of gas pipelines]. Moscow: Nedra Publ., 1982.
- [4] Y. I. Stentsel, Matematychnе modelyuvannya tekhnolohichnykh obyektiv keruvannya: Navch. posibnyk [Mathematical modeling of technological control plants: Educational handbook]. Kyiv: ISDO Publ., 1993.
- [5] ISO 5167-1:2003 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full - part 1: General principles and requirements.