

УДК 620.179:681.121

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-9>

Малісевич Н., аспірантка, Середюк О. Є., д.т.н.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ НА
ВИМІРЮВАННЯ ЙОГО ВИТРАТИ ТОРЦЕВИМИ СОПЛАМИ

***Анотація.** Проведено аналіз відомих нормативних документів і технічних рішень для визначення теплоти згоряння природного газу. Охарактеризовано патентозахищений метод і алгоритм контролю теплоти згоряння, який базується на вимірювання температури спалювання газу за умови вимірювання витрати природного газу за допомогою спеціальних звужувальних пристроїв – торцевих сопел. З використанням комп'ютерного моделювання досліджено взаємозв'язок фізичних характеристик і компонентного складу природного газу з його теплотою згоряння за умови вимірювання витрати газу торцевими соплами. Отримані алгоритмічні залежності між теплотою згоряння природного газу і його коефіцієнтом стисливості, який визначається впливом густини газу і вмісту негорючих компонентів. Кількісно оцінено вплив зміни густини природного газу на коефіцієнт стисливості і теплоту згоряння газу порівняно із зміною вмісту азоту і вуглекислого газу. Досліджено вплив густини газу і вмісту азоту на показник адіабати і коефіцієнт розширення газу при вимірюванні витрати торцевим соплом пальника. Результати моделювання дозволили запропонувати ітераційно-експериментальний метод розрахунку теплоти згоряння природного газу при його експериментальному визначенню без безпосереднього вимірювання густини газу.*

Ключові слова: природний газ, теплота згоряння, торцеве сопло, витрата, коефіцієнт стисливості, коефіцієнт розширення, густина газу, комп'ютерне моделювання.

Актуальність задачі. Облік природного газу на сьогоднішній час потребує вдосконалення, що зумовлює необхідність застосування не тільки більш точних засобів вимірювання витрати об'єму газу, але і застосування нових концептуальних підходів у його практичній реалізації. Це стосується здійснення обліку природного газу інформаційно-вимірювальними системами в одиницях енергії, що повинно гармонізуватися з міжнародними підходами [1, 2] і відповідати національному стандарту України [3]. Актуальність вирішення цього питання підкреслюється запровадженням з 1 січня 2020 року нового національного стандарту [4], який регламентує дві системи створення пристроїв перетворення в енергію (ППЕ, термінологія із [4]) облікованого об'єму природного газу. Ці ППЕ формують вхідну інформацію для обчислювача енергії і фактично є складовою частиною інформаційно-вимірювальних систем обліку енергії природного газу.

У першому виді система ППЕ містить засіб визначення теплоти згоряння (ЗВТЗ), який монтований локально та є складовою частиною ППЕ. Ця структура системи містить обчислювач енергії, який може використовувати згенерований сигнал від локально монтованого ЗВТЗ для визначення енергії.

У другому виді система ППЕ не передбачає локального встановлення ЗВТЗ, а передбачає використовувати тільки його вихідний сигнал як від зовнішнього перетворювача системи. При цьому також обчислювач може приймати для визначення енергії фіксоване значення сигналу теплоти згоряння або яке періодично оновлюється.

Таким чином, при вимірюванні енергії природного газу обов'язковим є застосування ЗВТЗ природного газу. Тому актуальним є запровадження ефективних систем контролю якості природного газу, які би характеризувалися не тільки достатньою точністю, але і швидкодією у поєднанні з якомога простішою конструктивною реалізацією. Тому актуальним є розроблення пристроїв для вимірювання і експрес-контролю теплоти згоряння газу, в тому числі, безпосередньо у споживачів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно із стандартом [3] для визначення теплоти згоряння природного газу можна застосовувати прямі і непрямі методи. Прямі методи передбачають використання засобів вимірювання, за функціонування яких проводять спалювання газу і визначають кількість енергії, що утворилася при цьому. Непрямі методи

передбачають визначення теплоти згоряння природного газу переважно розрахунковими методами при наявній інформації про компонентний склад природного газу. Спалювання газу при цьому відсутнє.

Найбільш поширеним непрямим методом визначення теплоти згоряння природного газу є розрахунковий метод [5, 6], що базується на використанні даних про компонентний склад природного газу, отриманих за допомогою хроматографічного аналізу. Хроматографи в основному є лабораторними засобами і застосовуються у відповідних підрозділах газотранспортних і газопостачальних організацій для періодичного і поточного контролю якості природного газу [7].

Однак застосування хроматографічного методу для визначення теплоти згоряння природного газу не може бути реалізоване при виконанні вимірювань безпосередньо у промислових чи побутових споживачів внаслідок дороговизни і складності технічної реалізації методу.

Вивчення сучасних технічних рішень у сфері вимірювання теплоти згоряння природного газу [8] показало, що наявною є обмежена кількість принципових підходів і схемних рішень для апаратного вимірювання і експрес-контролю якості природного газу безпосередньо у газоспоживачів, серед яких можуть бути конкретизовані патентозахищені рішення [9-11]. Оскільки відсутні дані про метрологічну атестацію дослідного або серійного зразка конкретних вимірювальних засобів на базі будь-якого із зазначених технічних підходів і кожен з них характеризується відповідними перевагами і недоліками, то актуальним є проведення наукових досліджень у сфері практичної реалізації методу експрес-визначення теплоти згоряння природного газу [11], який запропонований авторами даної публікації.

В дослідженнях [12, 13] експериментально підтверджено працездатність запропонованого способу експрес-визначення теплоти згоряння природного газу і визначення умов, за яких відкриваються можливості його практичної реалізації. Водночас деякою складністю практичної реалізації способу є необхідність наявності інформації про густину природного газу. Тут необхідно зауважити, що це не стосується питання хроматографічного аналізу, оскільки при хроматографічному аналізі визначається компонентний склад газу і за його результатами стає можливим визначення теплоти згоряння. Згідно запропонованого нами способу [11] необхідно вимірювати густину газу для розрахунку його витрати через торцеве сопло звужувального пристрою у пальнику, де згорає суміш газу і повітря. Адже, наприклад, зростання густини газу не завжди характеризує зростання його теплоти згоряння, що завжди має місце для суміші вуглеводневих компонент із збільшенням молярної маси. До зростання густини газу також може привести збільшення частки азоту чи вуглекислого газу, які є негорючими компонентами, і за цих умов теплота згоряння буде зменшуватися. Ці фактори безпосередньо також будуть впливати на результати вимірювання витрати газу з використанням спеціальних звужувальних пристроїв (в нашому прикладі торцевих сопел). Тому доцільним є дослідження кореляційних зв'язків між фізичними параметрами природного газу (коефіцієнта стисливості, коефіцієнта розширення, показника адіабати), які впливають на результат вимірювання витрати газу методом змінного перепаду тиску і теплою згоряння досліджуваного газу.

Метою роботи є моделювання впливу теплоти згоряння природного газу на фізичні параметри природного газу які визначають точність вимірювання витрати торцевими соплами при реалізації методу експрес-визначення і контролю теплоти згоряння природного газу.

Викладення основного матеріалу. Суть запропонованого способу визначення теплоти згоряння природного газу полягає у використанні інформативного параметра – температури спалювання [11]. При реалізації способу повинно забезпечуватися згоряння суміші заданого об'ємного співвідношення досліджуваного газу із повітрям при застосуванні пальника спеціальної конструкції, у якому використовується торцеве сопло як первинних перетворювач витрати для вимірювання об'ємної витрати спалюваного досліджуваного газу. Реалізація способу передбачає попереднє встановлення градууювальної характеристики засобу вимірювання як функціональної залежності теплоти згоряння природного газу від температури полум'я пальника і витрати досліджуваного газу.

Алгоритм реалізації вимірювального контролю при визначенні теплоти згоряння природного газу на основі розробленої фізичної моделі записується формулою [8]:

$$H_c = \frac{(A \cdot T - B \cdot K_i \cdot \varphi \cdot q_c \cdot \tau)}{q_c \cdot \tau}, \quad (1)$$

де H_c – нижча теплота згоряння природного газу за стандартних умов, Дж/м³; A – коефіцієнт конструктивного виконання пальника, Дж/К; T – вимірювана температура полум'я пальника, °С; B – питома теплота пароутворення води, яка визначається вологістю повітря, яке приймає участь у спалюванні газу, Дж/кг; K_i – коефіцієнт співвідношення об'ємів повітря і досліджуваного газу у пальнику, м³/м³; φ – абсолютна вологість повітря навколишнього середовища, кг/м³; q_c – об'ємна витрата газу в пальнику за стандартних умов, м³/год; τ – тривалість пропуску об'єму газу через пальник, с.

Значення коефіцієнта конструктивного виконання пальника A необхідно визначити експериментальним методом під час попереднього калібрування пристрою експрес-визначення теплоти згоряння природного газу щонайменше на трьох його взірцях відомої теплоти згоряння як функцію від робочих параметрів згоряння газу.

Оскільки при спалюванні газу згідно алгоритму (1) необхідне достатньо точне визначення його витрати, то одним із напрямків практичної реалізації може бути застосування первинних перетворювачів з використанням торцевих звужувальних пристроїв (ЗП) [11].

При цьому об'єм природного газу, що проходить через торцевий ЗП, розраховується за формулою:

$$q_c = 5,9736 \cdot 10^{-2} \alpha \varepsilon d^2 K_\varphi \sqrt{\frac{P \Delta p}{\rho_c T K}}, \quad (2)$$

де α – коефіцієнт витрати ЗП; ε – поправний множник на розширення газу при протіканні його через ЗП; d – діаметр отвору ЗП пальника; Δp – перепад тиску на ЗП; ρ_c – густина природного газу за стандартних умов; K_φ – коефіцієнт, який враховує вологість природного газу; P , T , K – абсолютний тиск, абсолютна температура і коефіцієнт стисливості природного газу за умов ЗП відповідно.

Коефіцієнт витрати α для ЗП визначається експериментальним шляхом при його індивідуальному градуванні за допомогою еталонного обладнання, наприклад, дзвонової еталонної установки [14].

Із аналізу формули (1) очевидним є вплив витрати q_c , яка визначається з використанням алгоритму (2). Звідси є очевидним взаємозв'язок між витратою q_c і змінними параметрами ε , ρ_c , K , які визначаються якісними характеристиками природного газу. При цьому, як наслідок, очевидно є наявність їх впливу на теплоту згоряння природного газу.

Вплив коефіцієнта K_φ на результат вимірювання витрати природного газу викладений в нормативному документі [15]. За умови відносної вологості природного газу менше 10%, що нормується умовами газопостачання споживачів приймається рівним одиниці. Також тут додамо, що вплив вологості природного газу і вологості навколишнього середовища при реалізації алгоритму (1) досліджено нами в [16].

При моделюванні зміни коефіцієнта стисливості використано алгоритм методу його розрахунку NX19мод. [17] за такого діапазону зміни фізичних характеристик і компонентного складу природного газу. При цьому молярна концентрація азоту становить (0,0075÷0,1) у відносних одиницях та вуглекислого газу (0,0005÷0,03) у відносних одиницях, густина газу (0,67÷0,73) кг/м³ і за таких заданих параметрів потоку газу через ЗП: абсолютний тиск (0,101825÷0,103325) МПа, абсолютна температура (283÷293) К.

Зважаючи на те, що кожен з цих параметрів може змінюватися у вказаних межах для умов функціонування пристрою експрес-вимірювання теплоти згоряння природного газу, необхідно дослідити вплив зміни кожного параметра на коефіцієнт стисливості. На основі проведених розрахунків побудовані графічні залежності зміни коефіцієнта стисливості від кожного вхідного параметра, за умови вибору середнього значення всіх інших вхідних параметрів.

Спочатку проведено моделювання зміни коефіцієнта стисливості від вмісту азоту x_{N_2} і вуглекислого газу x_{CO_2} (рис. 1) і від густини природного газу (рис. 2). Для моделювання використовувалася методика NX19мод. [17]. Встановлено суттєво більший вплив зміни густини газу на зміну коефіцієнта стисливості порівняно із зміною вмісту азоту x_{N_2} і вуглекислого газу

x_{CO_2} . Так при зміні густини на 10%, наприклад від 0,7 до 0,77 кг/м³ коефіцієнт стисливості змінюється на $4 \cdot 10^{-6}$, що становить $4 \cdot 10^{-4}$ %. Водночас при зміні вмісту азоту на 10%, наприклад від 0,05 до 0,055 відносних одиниць – коефіцієнт стисливості змінюється на $2 \cdot 10^{-7}$, що становить $2 \cdot 10^{-5}$ %. А при зміні вмісту вуглекислого газу на 10%, наприклад від 0,02 до 0,022 відносних одиниць – коефіцієнт стисливості змінюється на $5 \cdot 10^{-7}$ що становить $2 \cdot 10^{-5}$ %. Тобто очевидними є практично на порядок більший вплив зміни густини газу на коефіцієнт стисливості, ніж зміни вмісту азоту чи вуглекислого газу.

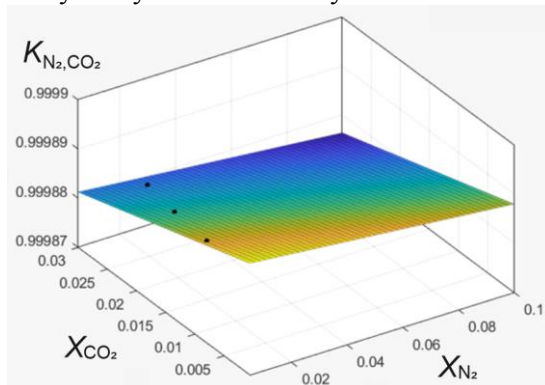


Рис. 1. Результати моделювання вмісту азоту і вуглекислого газу на коефіцієнт стисливості природного газу

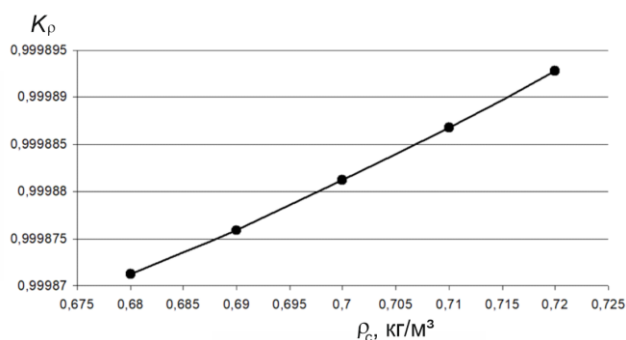


Рис. 2. Результати моделювання густини природного газу на його коефіцієнт стисливості

За результатами моделювання отримані такі апроксимаційні залежності зміни коефіцієнта стисливості від досліджуваних параметрів:

$$K_{N_2, CO_2} = 0,9999 - 5,143 \cdot 10^{-5} \cdot x_{N_2} - 0,0003921 \cdot x_{CO_2}; \quad (3)$$

$$K_{\rho} = 0,0021 \cdot \rho_c^2 - 0,0024 \cdot \rho_c + 1,0005. \quad (4)$$

де K_{N_2, CO_2} – коефіцієнт стисливості при роздільній зміні вмісту азоту і вуглекислого газу; K_{ρ} – коефіцієнт стисливості при зміні густини газу.

Для аналізованих складів газу здійснювався розрахунок їх нижчої теплоти згоряння з використанням формули [6]:

$$H = 85,453 \cdot (0,52190 \cdot \rho_c + 0,04242 - 0,65197 \cdot x_{N_2} - x_{CO_2}). \quad (5)$$

де H – нижча теплоти згоряння за стандартних умов, яка є функцією трьох змінних ρ_c , x_{N_2} і x_{CO_2} .

Це дало можливість здійснити моделювання закономірностей зміни теплоти згоряння H за умов попередньо вибраних діапазонів зміни параметрів x_{N_2} , x_{CO_2} , ρ_c , що відображено на рис. 3, 4.

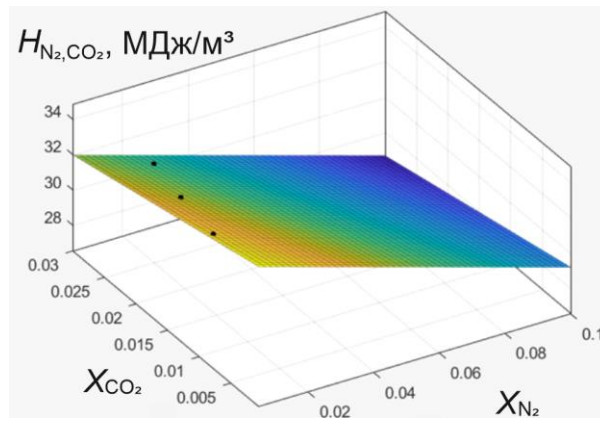


Рис. 3. Результати моделювання вмісту азоту і вуглекислого газу на теплоту згоряння природного газу

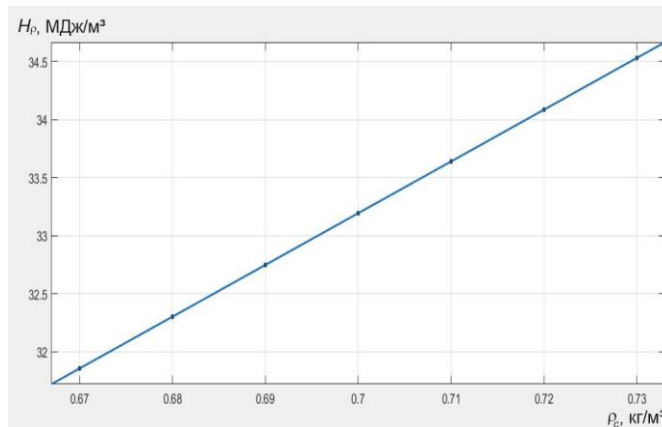


Рис. 4. Результати моделювання густини газу на його теплоту згоряння

Теплота згоряння H_{N_2,CO_2} моделювалася при змінних x_{N_2} , x_{CO_2} і постійному значенню густини $\rho_c=0,7$ кг/м³, а теплота згоряння H_{ρ} моделювалася при змінній густині ρ_c та постійних значеннях $x_{N_2}=0,05$, $x_{CO_2}=0,015$.

Отримані результати моделювання не суперечать відомим фізичним закономірностям, тобто із зростанням вмісту азоту і вуглекислого газу відбувається зменшення його теплоти згоряння, а із збільшенням густини відбувається зростання теплоти згоряння. Вплив цих параметрів на зміну теплоти згоряння характеризується різною чутливістю, що можна обчислити з графіків або з отриманих апроксимаційних залежностей:

$$H_{N_2,CO_2} = 34,84 - 55,71 \cdot x_{N_2} - 85,45 \cdot x_{CO_2} \quad (6)$$

$$H_{\rho} = 44,6 \cdot \rho_c + 1,976 \quad (7)$$

Наступним етапом досліджень було встановлення залежності між теплотою згоряння і коефіцієнтами стисливості K_{ρ} і K_{N_2,CO_2} (рис. 5, 6).

$$H_{N_2,CO_2} = 3,214 \cdot 10^5 \cdot K_{N_2,CO_2} - 3,213 \cdot 10^5 \quad (8)$$

$$H_{\rho} = -5,802 \cdot 10^8 \cdot K_{\rho}^2 + 1,16 \cdot 10^9 \cdot K_{\rho} - 5,802 \cdot 10^8 \quad (9)$$

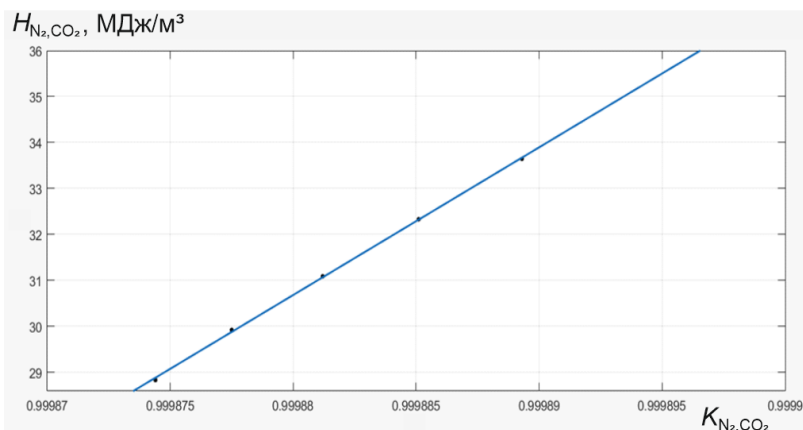


Рис. 5. Графічна ілюстрація взаємозв'язку коефіцієнта стисливості K_{N_2,CO_2} із теплотою згоряння газу

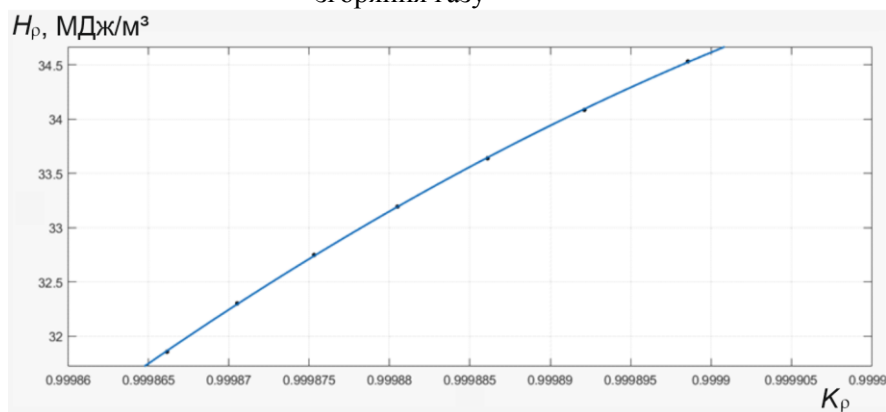


Рис. 6. Графічна ілюстрація взаємозв'язку коефіцієнта стисливості K_p газу із його теплотою згоряння

Це моделювання також підтверджує про більший вплив на теплоту згоряння зміни складової коефіцієнта стисливості від густини порівняно із складовою коефіцієнта стисливості від вмісту азоту і вуглекислого газу.

Так як впливовими факторами на зміну коефіцієнта стисливості є три параметри, то для ілюстрації об'єднаного впливу здійснено моделювання зміни коефіцієнта стисливості від двох параметрів (густини та суми негорючих складових) (рис. 7), а також аналогічне моделювання теплоти згоряння від цих параметрів (рис. 8).

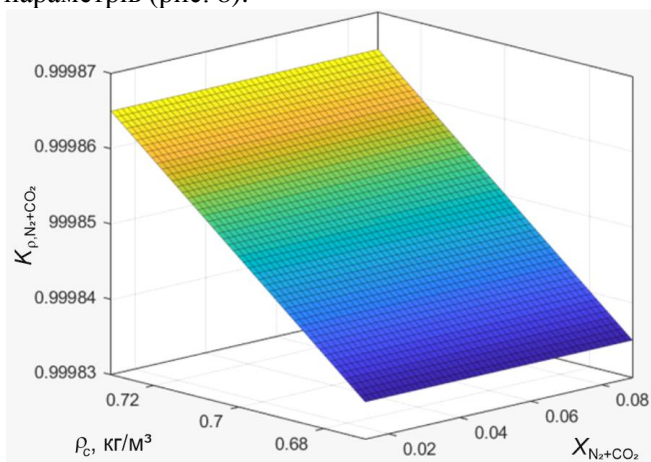


Рис. 7. Результати моделювання вмісту суми негорючих складових і густини газу на його коефіцієнт стисливості

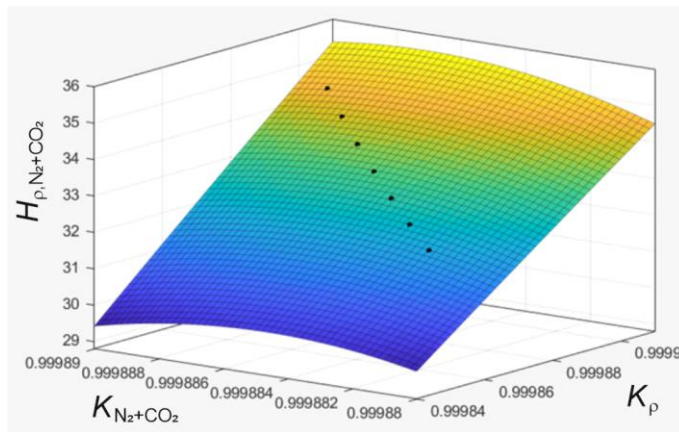


Рис. 8. Результати моделювання двох складових коефіцієнту стисливості (суми негорючих складових і густини газу) на його теплоту згоряння

Ці рисунки також підтверджують про суттєво більший вплив зміни густини як на коефіцієнт стисливості газу так і на його теплоту згоряння порівняно із впливом зміни негорючих компонентів.

Формульне подання отриманих залежностей має вигляд:

$$K_{\rho, N_2+CO_2} = 0,9995 - 3,08 \cdot 10^{-13} \cdot x_{N_2+CO_2} + 0,0005 \cdot \rho_c \quad (10)$$

$$H_{\rho, N_2+CO_2} = \left(\begin{array}{l} -1,864 \cdot 10^{10} - 1,387 \cdot 10^9 \cdot K_{\rho} + 3,868 \cdot 10^{10} \cdot K_{N_2+CO_2} - \\ - 2,684 \cdot 10^7 \cdot K_{\rho}^2 + 1,441 \cdot 10^9 \cdot K_{\rho} \cdot K_{N_2+CO_2} - 2,006 \cdot 10^{10} \cdot K_{N_2+CO_2}^2 \end{array} \right) \quad (11)$$

Враховуючи, що в формулі (2) витрата q_c залежить від коефіцієнта розширення робочого середовища (природного газу), то проведено моделювання зміни показника адиабати κ і коефіцієнта розширення ε . При цьому використовувався алгоритм:

$$\kappa = \left(\begin{array}{l} 1,556 \cdot (1 + 0,074 \cdot x_{N_2}) - 3,9 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot (1 - 0,68 \cdot x_{N_2}) - 0,208 \cdot \rho_c + \\ + \left(\frac{P}{T} \right)^{1,43} \cdot \left[384 \cdot (1 - x_{N_2}) \cdot \left(\frac{P}{T} \right)^{0,8} + 26,4 \cdot x_{N_2} \right] \end{array} \right) \quad (12)$$

$$\varepsilon = \left[\left(1 - \frac{\Delta p}{P} \right)^{\frac{2}{\kappa}} \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \frac{1 - \left(1 - \frac{\Delta p}{P} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}}}{\frac{\Delta p}{P}} \cdot \frac{1 - m^2}{1 - m^2 \cdot \left(1 - \frac{\Delta p}{P} \right)^{\frac{2}{\kappa}}} \right]^{0,5} \quad (13)$$

де m – модуль торцевого звукувального пристрою.

Результати моделювання наведені на рис. 9, 10, які показують, що коефіцієнт розширення практично не залежить від показника адиабати і визначається головним чином перепадом тиску на торцевому ЗП, який є розрахованим параметром за результатами вимірювання $\Delta p, P$. Тому для умов вимірювання теплоти згоряння природного газу його можна вважати сталим і попередньо розрахованим для певного складу газу з врахуванням фізичних умов функціонування торцевих сопел.

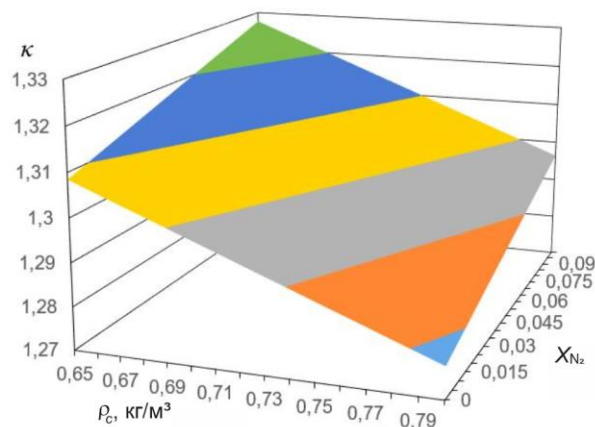
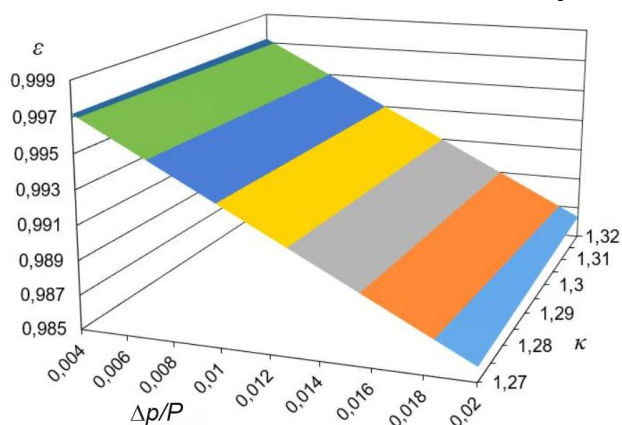


Рис. 9. Результати моделювання показника адиабати від вмісту азоту та густини газу

Рис.10. Результати моделювання коефіцієнта розширення від показника адиабати та відношення $\Delta p/P$

Отримані результати моделювання дозволяють застосувати ітераційний метод при розрахунку теплоти згоряння природного газу. Його реалізація передбачає застосування даних газопостачальної організації про густину і фізичні характеристики природного газу за попередній інформативний період для даного об'єкту газоспоживання, для проведення обчислень по визначенню теплоти згоряння природного газу при першій ітерації. При наступній ітерації враховується взаємозв'язок отриманого першого розрахункового значенням теплоти згоряння з параметрами газу ε , ρ_c і K , які враховуються для наступного обчислення витрати і теплоти згоряння. Кількість ітерацій визначається ступенем наближення кожного наступного обчислення до попереднього, що потребує подальших досліджень для практичної реалізації ітераційного методу.

Водночас такий підхід виключає необхідність вимірювання густини природного газу при реалізації способу експрес-вимірювання, що суттєво спрощує його практичну реалізацію. Доцільно тут також зауважити, що ітераційний метод розрахунку потребує практичної апробації з використанням природного газу за різних взірців відомої теплоти згоряння і відомого його компонентного складу для проведення можливої корекції алгоритму ітераційного методу розрахунку. Це буде метою подальших досліджень.

Висновки. Проведено аналіз відомих нормативних документів і технічних рішень для визначення теплоти згоряння природного газу. Охарактеризовано патентозахищений метод і алгоритм контролю теплоти згоряння, який базується на вимірювання температури спалювання газу за умови згоряння суміші природного газу і повітря заданого об'ємного співвідношення і вимірювання витрати природного газу за допомогою спеціальних звукувальних пристроїв – торцевих сопел.

З використанням комп'ютерного моделювання досліджено взаємозв'язок фізичних характеристик і компонентного складу природного газу з його теплою згоряння за умови вимірювання витрати газу торцевими соплами. Отримані алгоритмічні залежності між теплою згоряння природного газу і його коефіцієнтом стисливості, який визначається впливом густини газу і вмісту негорючих компонентів. Встановлено на порядок більший вплив

зміни густини природного газу на коефіцієнт стисливості і теплоту згоряння газу порівняно із зміною вмісту азоту і вуглекислого газу.

Досліджено вплив густини газу і вмісту азоту на показник адиабати і коефіцієнт розширення газу при вимірюванні витрати торцевим соплом пальника. Показано, що найбільш суттєвим впливом характеризуються умови функціонування торцевого сопла, які визначаються відношенням перепаду тиску на соплі до абсолютного тиску на його вході.

Результати моделювання дозволили запропонувати ітераційний метод розрахунку теплоти згоряння природного газу при його експериментальному визначенні без безпосереднього вимірювання густини газу на основі попереднього задання значення густини природного газу і врахування впливу параметрів коефіцієнта стисливості і розширення на теплоту згоряння газу.

Подальші дослідження будуть спрямовані на розроблення практичного алгоритму ітераційно-експериментального методу визначення теплоти згоряння природного газу.

Інформаційні джерела

1. ISO 15112:2007. Natural Gas – Energy determination.
2. EN 1776:2015. Gas infrastructure. Gas measuring systems. Functional requirements.
3. ДСТУ ISO 15112:2009. Природний газ. Визначення енергії: [Чинний від 2011-01-01]. Вид. офіц. Київ: держспоживстандарт України, 2011. 53 с. (Національний стандарт України).
4. ДСТУ EN 12405-2:2018 (EN 12405-2:2012, IDT). Лічильники газу. Пристрої перетворювання. Частина 2. Перетворювання в енергію: [Чинний від 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 46 с. (Національний стандарт України).
5. ГОСТ 22667-82. Газы горючие природные. Расчетный метод определения теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе. [Введен с 1983-07-01]. Изд. офиц. Москва : Изд-во стандартов, 2006. 3 с.
6. ГОСТ 30319.1-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки: [Введен с 1997-07-01]. Изд. офиц. Минск, 1996. 21 с. (Межгосударственный стандарт).
7. Як це працює. Енергетичні одиниці замість кубометрів газу (How it works. Energy units instead of cubic meters of gas). *104.ua* : веб-сайт. URL: <https://104.ua/ua/analytics/id/jak-ce-pracjuje.-energetichni-odinici-zamist-kubom-21751> (дата звернення: 27.02.2020).
8. Середюк О.Є., Малісевич Н.М. Аналіз патентозахищених технічних рішень у сфері визначення теплоти згоряння природного газу. *Методи та прилади контролю якості*. 2018. № 1 (40). С. 58-69.
9. Спосіб оперативного визначення теплоти згоряння газоподібних палив / Большаков В.І., Полевий Г.А., Прокопенко П.Г., Жилка О.І. : пат. 84975 С2 Україна. № а200703615; заявл. 02.04.07; опубл. 10.12.08; Бюл. № 23. 4 с.
10. Спосіб експрес-визначення теплоти згоряння природного газу / Карпаш О.М., Дарвай І.Я., Карпаш М.О. [та ін.] : пат. 92846 С2 Україна. № а200905201; заявл. 25.05.09; опубл. 10.12.10, Бюл. № 23. 6 с.
11. Спосіб експрес-визначення теплоти згоряння природного газу / Середюк О.Є., Лютенко Т.В., Малісевич Н.М.: пат. 112737 С2 Україна. № а201512215; заявл. 09.12.2015; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 19. 7 с.
12. Середюк О.Є., Малісевич Н.М. Дослідження методичної похибки вимірювання температури полум'я при згоранні природного газу. *Technical using of measurement–2020*: тези доп. VI всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених у царині інформаційно-вимірювальних технологій та метрології, м. Славське, 4-7 лютого 2020 р., Львів: ТЗОВ «Галицька видавнича спілка», 2020. С. 146-149.
13. Малісевич Н.М., Середюк О.Є. Апробація експрес-контролю теплоти згоряння паливних газів за їх температурою при спалюванні. *Прикладні науково-технічні дослідження*. Том 1: тези доп. IV міжнар. наук.-практ. конф., 1-3 квітня 2020 р., Івано-Франківськ: Академія технічних наук України, 2020. С. 97-98.
14. Облік природного газу: довідник / [М.П.Андрішин, О.М.Карпаш, Я.С.Марчук, І.С.Петришин, О.Є.Середюк, С.А.Чеховський]; за ред. С.А.Чеховського. – Івано-Франківськ: ПП «Сімик», 2008. – 180 с.
15. ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звукувальних пристроїв. Частина 2. Діафрагми. Технічні

вимоги: [Чинний від 2010-04-01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 2009. 92 с. (Державний стандарт України).

16. Середюк О., Малісевич Н. Дослідження впливу конструктивних факторів на технічну реалізацію методу експрес-контролю теплоти згорання природного газу. *Перспективні технології та прилади*. зб. наук. праць. Вип. 15 (грудень, 2019). Луцьк: Луцький НТУ, 2019. С. 81-89.

17. ГОСТ 30319.2-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости: [Введен с 1997-07-01]. Изд. офиц. Минск, 1996. 65 с. (Межгосударственный стандарт).

Н. Малісевич, аспірантка О. Середюк, д.т.н.,

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ИЗМЕРЕНИЕ ЕГО РАСХОДА ТОРЦЕВЫМИ СОПЛАМИ

Проведен анализ известных нормативных документов и технических решений для определения теплоты сгорания природного газа. Рассмотрен патентозащищенный метод и алгоритм контроля теплоты сгорания, базирующийся на измерении температуры сжигания газа при измерении расхода природного газа с помощью специальных сужающих устройств – торцевых сопел. С использованием компьютерного моделирования исследована взаимосвязь физических характеристик и компонентного состава природного газа с его теплотой сгорания при измерении расхода газа торцевыми соплами. Получены алгоритмические зависимости между теплотой сгорания природного газа и его коэффициентом сжимаемости, который определяется влиянием плотности газа и содержания негорючих компонент. Количественно оценено влияние изменения плотности природного газа на коэффициент сжимаемости и теплоту сгорания газа с учетом изменения содержания азота и углекислого газа. Исследовано влияние плотности газа и содержания азота на показатель адиабаты и коэффициент расширения газа при измерении расхода торцевым соплом горелки. Результаты моделирования позволили предложить итерационно-экспериментальный метод расчета теплоты сгорания природного газа при его экспериментальному определению без непосредственного измерения плотности газа.

Ключевые слова: природный газ, теплота сгорания, торцевое сопло, расход, коэффициент сжимаемости, коэффициент расширения, плотность газа, компьютерное моделирование.

N. Malisevich, PhD student, O. Serediuk, Doctor of Technical Sciences

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

SIMULATION OF THE INFLUENCE OF NATURAL GAS COMBUSTION HEAT ON THE MEASUREMENT OF ITS CONSUMPTION BY END NOZZLES

The analysis of known normative documents and technical decisions for determination of heat of combustion of natural gas is carried out. The patent-protected method and algorithm of combustion heat control are described, which is based on measuring the combustion temperature of gas under the condition of measuring the consumption of natural gas with the help of special narrowing devices - end nozzles. Using computer simulations, the relationship between the physical characteristics and component composition of natural gas with its heat of combustion under the condition of measuring gas flow with end nozzles was studied. Algorithmic dependences between the heat of combustion of natural gas and its compressibility coefficient, which is determined by the influence of gas density and the content of non-combustible components, are obtained. The influence of changes in the density of natural gas on the coefficient of compressibility and heat of combustion of gas compared with the change in the content of nitrogen and carbon dioxide was quantified. The influence of gas density and nitrogen content on the adiabatic index and the coefficient of gas expansion when measuring the flow with the end nozzle of the burner was studied. The simulation results allowed to propose an iterative-experimental method of calculating the heat of combustion of natural gas in its experimental determination without direct measurement of gas density.

Keywords: natural gas, heat of combustion, end nozzle, flow rate, compressibility coefficient, expansion coefficient, gas density, computer simulation.

© Н. Малісевич, аспірантка, О. Середюк С., д.т.н.