

DOI: 10.33955/2307-2180(2)2020.44-50

УДК 620.179

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРУ ЗА ЕКСПРЕС-КОНТРОЛЮ ТЕПЛОТИ ЗГОРАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

**Research of the Influence
of Temperature Factor on Express Control
of Natural Gas Combustion Heat**



О. Є. Середюк, доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри метрології
та інформаційно-вимірювальної техніки,
e-mail: zarichna@nung.edu.ua

Н. М. Малісевич, аспірантка кафедри,
e-mail: nat-mal-vit-2007@ukr.net
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу, Україна

O. E. Seredyuk, doctor of technical sciences, professor,
head of the department of metrology
and information and measurement engineering,
e-mail: zarichna@nung.edu.ua

N. M. Malisevich, graduate student of the department,
e-mail: nat-mal-vit-2007@ukr.net
Ivano-Frankivsk National Technical University
of Oil and Gas, Ukraine

Досліджено вплив якісного і кількісного складу газових середовищ на температуру полум'я спалюваного газу за різних значень витрати газу і зміни умов його згорання. Розглянуто функціональну схему розробленого лабораторного стенда, який забезпечує дослідження впливу калорійності газу на температуру його згорання. Здійснено комп'ютерне моделювання й отримано апроксимаційні рівняння зміни температури полум'я від умов згорання. Обґрунтовано можливість реалізації пристрою експрес-контролю теплоти згорання природного газу шляхом вимірювання температури полум'я згорання досліджуваних газів.

The article is devoted to the study of the influence of the qualitative and quantitative composition of gas environments on the flame temperature of the combusted gas at different values of gas flow rate and changes volume ratio gas-air in its combustion. The functional scheme of the developed laboratory stand (Fig. 1), which provides temperature measurement during combustion of natural gas or propane-butane mixture, is considered. The design of the developed burner is described and the experimental researches are carried out when measuring the flame temperature of the combusted gas during the operation of the laboratory stand. The operating conditions of different thermocouples in measuring the temperature of the flared gas are investigated (Fig. 2). The temperature instability in the lower and

upper flames was experimentally determined (Fig. 3) and its difference from the reference data [12, 13]. The measurement of the flame temperature with a uncased thermocouple and two thermocouples of different types with protective housings is realized. Methodical error of temperature measurement by different thermocouples was estimated (Fig. 5). An algorithm for the implementation of measurement control in determining the heat of combustion of natural gas according to the patented method is outlined [11]. Experimental studies of temperature changes of combusted gas mixtures at different gas flow rates and different ratios with air, which is additionally supplied for gas combustion, were carried out (Figs. 4, 7). The computer simulation (Figs. 6, 8) of the change in the flame temperature was performed on the basis of the experimental data, which allowed to obtain approximate equations of the functional dependence of the flame temperature on the gas flow rate and the ratio of the additional air and gas consumption. The possibility of realization of the device of express control of the heating value of natural gas by measuring the combustion temperature of the investigated gases, which is based on the experimentally confirmed increase in the flame temperature of the investigated gases with increasing their calorific value, is substantiated (Fig. 9). The necessity of further investigation of the optimization design characteristics of the burner and the operating conditions of combustion of the gases under rapid control of their combustion heat was established (Fig. 9).

Ключові слова: теплота згорання, природний газ, пропан-бутанова суміш, спалювання, температура полум'я, термоперетворювач, експрес-контроль, лабораторний стенд, комп'ютерне моделювання.

Keywords: combustion heat, natural gas, propane-butane mixture, combustion, flame temperature, thermoconverter, express control, laboratory bench, computer simulation.

На сьогодні економіка України вимагає раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів, оскільки це є не тільки підходом до їх економії на загальнодержавному рівні, але й джерелом економії грошових затрат у промисловості



О. Є. Середюк



Н. М. Малісевич

та побутової сфері. Вирішення такого завдання вимагає досягнення необхідної точності вимірювань за обліку енергоносіїв, у тому числі природного газу, із застосуванням при цьому сучасних методологічних концепцій, які відповідають міжнародним підходам і нормативним документам. Так, закордонні нормативні документи [1, 2] і національний стандарт України [3] рекомендують здійснювати облік природного газу інформаційно-вимірювальними системами в одиницях енергії. Для цього необхідно вимірювати не тільки об'єм спожитого природного газу, але й враховувати його теплоту згорання, що також повинно безпосередньо впливати на його вартість. Такий підхід потребує запровадження ефективних систем обліку та контролю якості природного газу [4], які на сьогодні потребують необхідного розвитку і становлення. Однак на сьогодні відсутні методики або нормативні документи, які би дозволяли коригувати вартість оплати з урахуванням якості, насамперед калорійності, спожитого природного газу. Визначення калорійності природного газу, яке проводиться на основі хроматографічного аналізу хімічними лабораторіями газопостачальних компаній не рідше одного разу на тиждень, не забезпечує оперативного контролю за якістю природного газу, в тому числі безпосередньо у споживачів. Це пов'язано з можливістю подавання газу від різних джерел (наприклад, за кільцевої системи газопостачання), а також часових змін якості газу протягом інтервалу відбору проб для хроматографічного аналізу газу. Ці фактори не сприяють підвищенню точності обліку природного газу в одиницях енергії. Тому актуальним є розроблення портативних пристроїв для експрес-контролю теплоти згорання газу безпосередньо у споживачів.

Згідно зі стандартом [3] для визначення теплоти згорання природного газу можна застосовувати прямі й непрямі методи. Прямі методи передбачають використання вимірювальних пристроїв, у яких проводять спалювання газу і визначають кількість енергії, що утворилася внаслідок цього. Непрямі методи передбачають визначення теплоти згорання природного газу переважно розрахунковими методами з урахуванням відомого компонентного складу природного газу. Спалювання газу при цьому не відбувається.

Найбільш поширеним непрямим методом визначення теплоти згорання природного газу є розрахунковий метод [5, 6], що базується на використанні даних стосовно компонентного складу природного газу, отриманих за допомогою хроматографічного аналізу. Хроматографи, в основному, є лабораторни-

ми 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 згорання природного газу не може бути реалізовано під час виконання вимірювань безпосередньо у промислових чи побутових споживачів.

Вивчення сучасних технічних рішень у сфері вимірювання теплоти згорання природного газу [8] засвідчило, що наявною є обмежена кількість принципів підходів і схемних рішень для апаратного експрес-контролю якості природного газу безпосередньо у газоспоживачів, серед яких можуть бути конкретизованими [9—11]. Оскільки немає даних стосовно результатів метрологічної атестації чи дослідного або серійного виготовлення вимірювальних засобів на базі будь-якого із зазначених технічних підходів, то актуальним є проведення експериментальних досліджень у сфері практичної реалізації методу експрес-контролю [11], який запропонований авторами цієї публікації. Актуальність дослідження саме такого підходу, на відміну від [9, 10], дозволяє враховувати прямим методом вплив вологи чи інших неспалюваних компонентів у складі природного газу на визначення його нижчої теплоти згорання. Водночас достатньо складним технічним завданням є вимірювання температури полум'я спалюваного газу, що практично не відображено у відомих наукових публікаціях.

Вивчення довідкових документів, нормативних і літературних джерел засвідчило відсутність конкретних нормованих температурних факторів, які би характеризували температуру полум'я в процесі згорання природного газу, який формує його енергопродуктивність, оскільки є сумішшю цих компонентів з непостійними об'ємними співвідношеннями. Також виявлено, що температура спалювання газу залежить від умов спалювання (параметрів навколишнього середовища), від кількості повітря, яке бере участь у горінні, а також від конструктивного виконання пальника. Так, за даними стандарту [12], температура полум'я метану за згорання у середовищі кисню за стандартних умов становить 2045 °С, а пропану — 2110 °С. За використання полум'я спалюваного газу в обладнанні для зварювання може розвиватися температура за згорання природного газу (2100...2200) °С і відповідно окремих його компонентів: метану (2043...2200) °С, пропану (2110...2500) °С, бутану (2118...2500) °С [13]. Тому також необхідно оцінити фактичну температуру

полум'я спалюваного газу за умов реалізації пристрою для експрес-контролю теплоти згорання природного газу [11].

Метою роботи є дослідження впливу температурного фактору на функціонування пристрою для експрес-контролю теплоти згорання природного газу за використання температури полум'я як інформативного параметра.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Авторами запропоновано спосіб визначення теплоти згорання природного газу за його температурою спалювання [11]. У процесі реалізації способу повинно забезпечуватися згорання суміші заданого об'ємного співвідношення досліджуваного газу з повітрям із застосуванням пальника спеціальної конструкції. Попередньо необхідно встановити градувальну характеристику засобу вимірювання як функціональну залежність теплоти згорання природного газу від температури полум'я пальника.

Алгоритм реалізації вимірювального контролю під час визначення теплоти згорання природного газу на основі запропонованої фізичної моделі записується формулою:

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

де H_c — нижча теплота згорання 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 бере 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 визначати експериментальним методом під час попереднього калібрування пристрою експрес-контролю теплоти згорання природного газу щонайменше на трьох його сумішах відомої теплоти згорання як функцію від робочих параметрів згорання газу.

Алгоритм (1) реалізації методу експрес-контролю теплоти згорання природного газу є наближеним, оскільки передбачається експериментальне визначення коефіцієнта A за згорання газоповітряної суміші за певного їх співвідношення. Тобто цей коефіцієнт є функціонально залежним від співвідношення газ-повітря і безпосередньо від витрати газу в паль-

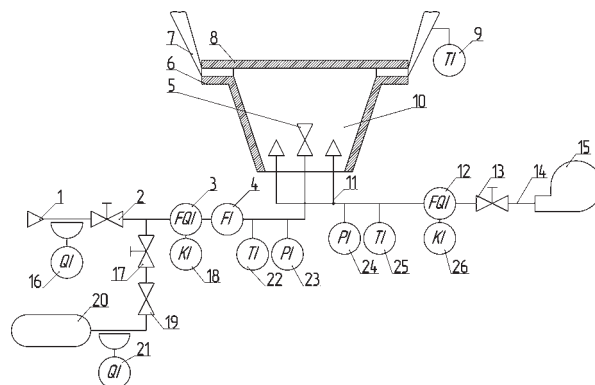


Рис. 1. Функціональна схема лабораторного стенда для дослідження температурного фактору за спалювання газу

Fig. 1. Functional diagram of the laboratory stand for the study of the temperature factor for gas combustion

нику, а також робочих параметрів умов згорання газу. Тому необхідно експериментально дослідити закономірності зміни температури полум'я за змінних параметрів умов згорання газу.

Розроблений лабораторний стенд (рис. 1) містить пальник у виді конструктивно вдосконаленої атмосферної горілки з технологічною можливістю подавання спалюваного газу і додаткового повітря для регулювання умов спалювання. Для досліджень вибрано пальник з камерою 10 змішування повітря з природним газом, яка утворена розсікачем 6 полум'я і кришкою 8 розсікача діаметром 80 мм. У камері 10 міститься торцевий звужувальний пристрій (сопло) 5, до якого подається природний газ від газової мережі гнучким трубопроводом 1 з регулюванням витрати за допомогою дросельного вентиля 2. Витрата газу у пальнику контролюється ротаметром 4 моделі РС-3А і обчислюється за допомогою побутового лічильника газу 3 моделі Premagas BK, типорозміру G1,6 і хронометра 18. Тиск газу в лінії перед соплом 5 вимірюється давачем надлишкового тиску 18 типу ROSEMOUNT моделі 2024 (верхній діапазон вимірювання 10 кПа) з вторинним цифровим приладом. Температура газу вимірюється цифровим термометром 23 моделі DS18B20. Лабораторний стенд передбачає можливість під'єднання балона 20 зі стиснутим природним або скрапленим газом з відомими фізико-хімічними показниками. У вихідній лінії балона 20 розміщено перекривний кран 19 і дросельний вентиль 17 подавання газу в технологічну лінію до камери 10. Витрата додаткового повітря для спалювання газу у лінії 14 формується повітродувкою 15 і дросельним вентилям 13. Додаткове повітря для кращого змішування зі спалюваним газом подається за допомогою декількох (у конструкції використаної горілки чотирьох)



Рис. 2. Ілюстрація вимірювання температури полум'я трьома типами термоперетворювачів
Fig. 2. An illustration of the measurement of flame temperature by three types of thermocouples

паралельних вхідних патрубків 11. Витрата повітря в лінії 14 обчислюється за допомогою побутового лічильника газу 12 моделі *Premagas BK*, типорозміру *G1,6* і хронометра 26. У складі лабораторного стенда передбачена можливість застосування пробовідбірників газу 16 і 21 для лабораторного визначення за допомогою хроматографа фізико-хімічних параметрів газу, який використовується під час проведення експериментів. Для вимірювання температури полум'я 7 спалюваного газу використовуються термометри 9.

У процесі досліджень для вимірювання температури полум'я використовувалися три види високотемпературних датчиків: термопара типу К (хромель-алюмель) у захисному керамічному корпусі (T_1), термопара типу НК-СА (нікель-копель — спеціальний алюмель) у захисному металевому корпусі (T_2) та мініатюрний температурний зонд типу К (хромель-алюмель) загального призначення з відкритим контактом моделі TP-10 (T_3) для роботи з цифровим мультиметром моделі *UNI-T M890G* [14], що ілюструється на рис. 2.

Методологічний аспект вимірювання температури передбачав урахування умов спалювання досліджуваного газу. Для цього інформація стосовно витрати газу та додаткового повітря під час досліджень, які були отримані за робочих умов функціонування лабораторного стенда, зводилися до стандартних умов за формулами:

$$q_{ГС} = q_{Г} \cdot \frac{p_{Г}}{p_{С}} \cdot \frac{T_{С}}{T_{Г}} \cdot \frac{1}{K_{Г}}, \quad (2)$$

$$q_{ПДС} = q_{ПД} \cdot \frac{p_{ПД}}{p_{С}} \cdot \frac{T_{С}}{T_{ПД}} \cdot \frac{1}{K_{ПД}}, \quad (3)$$

де $q_{ГС}$ і $q_{ПДС}$ — витрати газу і додаткового повітря за стандартних умов відповідно, $q_{Г}$ і $q_{ПД}$ — витрати газу і додаткового повітря за робочих умов відповідно, $p_{Г}$ і $T_{Г}$ — абсолютний тиск і абсолютна температура газу перед соплом пальника відповідно, $p_{ПД}$

і $T_{ПД}$ — абсолютний тиск і абсолютна температура додаткового повітря у змішувачі пальника (на виході сопла) відповідно, $p_{С}$ і $T_{С}$ — значення стандартного тиску і стандартної температури відповідно, $K_{Г}$ і $K_{ПД}$ — коефіцієнти стисливості газу і повітря відповідно.

Коефіцієнт співвідношення витрат додаткового повітря і газу γ розраховувався за формулою:

$$\gamma = q_{ПДС} / q_{ГС}. \quad (4)$$

Спочатку було проведено вимірювання температури полум'я, використовуючи датчик температури T_3 (термопара хромель-алюмель) без захисного кожуха. Температура полум'я вимірювалася в двох точках: внизу біля виходу з пальника $T_{Н}$ та у верхній частині полум'я — $T_{В}$. При цьому витрата природного газу змінювалася від 0,1 до 0,36 м³/год за умови подавання постійної витрати додаткового повітря $q_{ПДС} = 0,55$ м³/год (рис. 3).

Вимірювання температури полум'я мініатюрним безкорпусним зондом характеризується суттєвим розкидом (100...200) °С внизу і вверху полум'я за різних витрат газу, що практично унеможливило достовірно вимірювати температуру полум'я. Тому наведені на рис. 3 результати є усередненими, оскільки в кожній точці розкид вимірювання містився в діапазоні, близькому до $\pm(40...50)$ °С. Водночас отримані значення температури спалювання суттєво відрізняються від даних із [12, 13], оскільки проведені експерименти стосувалися згорання газу в середовищі повітря, а не в середовищі кисню.

Отримані результати вимірювання обґрунтовують доцільність вимірювання температури полум'я за допомогою датчиків T_1 і T_2 із захисними кожухами, які можна розміщувати безпосередньо у полум'ї спалюваного газу, що ілюстровано на рис. 2.

З метою визначення можливої методичної похибки вимірювання температури термопарами T_1 і T_2 , внаслідок деякої неідентичності процесів теплообміну за обтікання кожухів термопар полум'ям газу, були проведені одночасні вимірювання двома термопарами.

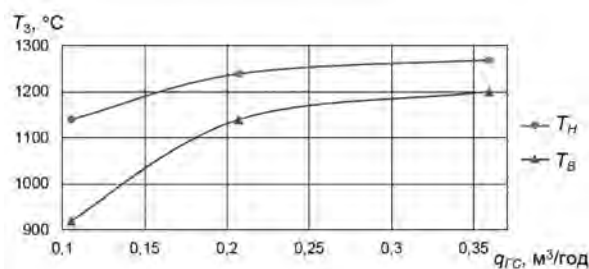


Рис. 3. Зміна температури в нижній $T_{Н}$ і верхній $T_{В}$ частинах полум'я
Fig. 3. Changing the temperature in the lower T_{N} and upper T_{V} flames

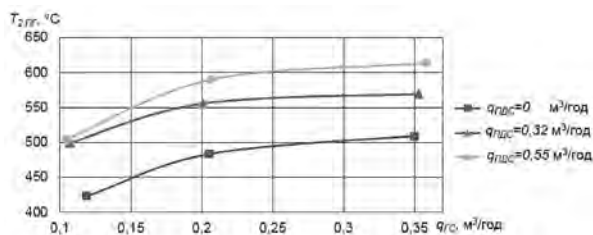


Рис. 4. Зміна температури згорання природного газу за вимірювання термопарою T_2 залежно від його витрати q_{GS} і витрати додаткового повітря q_{PDS}
 Fig. 4. Changing the combustion temperature of natural gas by measuring the thermocouple T_2 depending on its flow q_{GS} and flow rate of additional air q_{PDS}

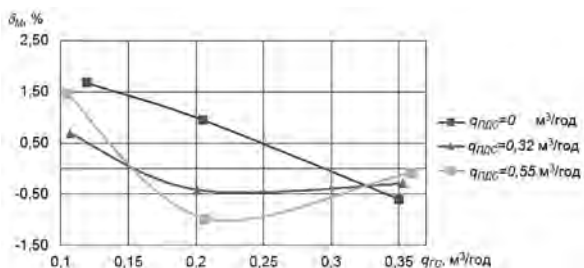


Рис. 5. Зміна методичної похибки від витрати газу і умов спалювання за вимірювання температури полум'я термопарами T_1 і T_2
 Fig. 5. Changing the methodical error from gas flow and combustion conditions for measuring the flame temperature by thermocouples T_1 and T_2

Результати вимірювання термопарою T_2 , за спалювання природного газу теплотворної здатності $35,3$ МДж/м³, наведено на рис. 4, а зміну похибки за цих умов, за вимірювання термопарою T_1 відносно T_2 , наведено на рис. 5.

Наведені залежності на рис. 4, 5 побудовані за умов відсутності витрати додаткового повітря $q_{PDS} = 0$ м³/год і двох фіксованих витратах додаткового повітря $q_{PDS} = 0,32$ і $0,55$ м³/год. Графіки ілюструють зростання температури полум'я спалюваного газу із зростанням як витрати газу, так і витрати додаткового повітря. Однак залежності є нелінійними, і більший вплив на зміну температури полум'я виявлено за малих витрат газу, тобто менших від $0,2$ м³/год. Навіть за відсутності додаткового повітря ця закономірність є близькою до умов із наявністю додаткового повітря, оскільки в процесі згорання бере участь кисень із навколишнього повітря, який змішується з газом безпосередньо на виході розсікача полум'я. Більша стабілізація наведених залежностей за витрат понад $0,2$ м³/год свідчить стосовно зменшення впливу витрати газу на температуру полум'я, що вказує на можливість вибору економічної та раціональної витрати у пальнику за контролю калорійності природного газу. Також було встановлено появу оранжевих язиків у полум'ї за зменшен-

ня витрати використуваного додаткового повітря. При цьому зростання інтенсивності забарвлення полум'я в оранжевий колір за однакової витрати газу свідчить стосовно нижчої температури згорання газу, що характеризує зниження ефективності використання газового обладнання, тобто зниження його теплогенерації.

Рис. 5 характеризує стосовно неперевіщення похибки $1,6$ % результатів вимірювання температури одночасно двома термопарами, причому за більших витрат газу ця похибка суттєво зменшується і за витрат газу $0,35$ м³/год не перевищує $0,5$ %.

Під час побудови залежностей на рис. 4, внаслідок різних значень витрати газу, коефіцієнт γ був змінним. Разом із тим для функціонування пристрою експрес-контролю потрібно дотримувати постійне співвідношення компонентів газо-повітряної суміші. Тому, використовуючи базу експериментально отриманих даних, здійснено моделювання температурного параметра за різних витрат газу та різних значень коефіцієнта γ (рис. 6).

Результати моделювання вказують на нелінійну закономірність зростання температури полум'я зі збільшенням як витрати газу, так і коефіцієнта γ і характеризують відносно наявності оптимізаційного виду досліджуваних характеристик.

Отримане апроксимаційне рівняння по двох змінних записується у виді:

$$T_{2ПГ} = 292,4 + 1363 \cdot q_{GS} + 32,24 \cdot \gamma - 2122 \cdot q_{GS}^2 + 107,6 \cdot q_{GS} \cdot \gamma - 5,015 \cdot \gamma^2, \quad (5)$$

де $T_{2ПГ}$ — температура полум'я за згорання природного газу, °C; q_{GS} — витрата природного газу, м³/год; γ — коефіцієнт співвідношення витрат додаткового повітря і газу, м³/м³.

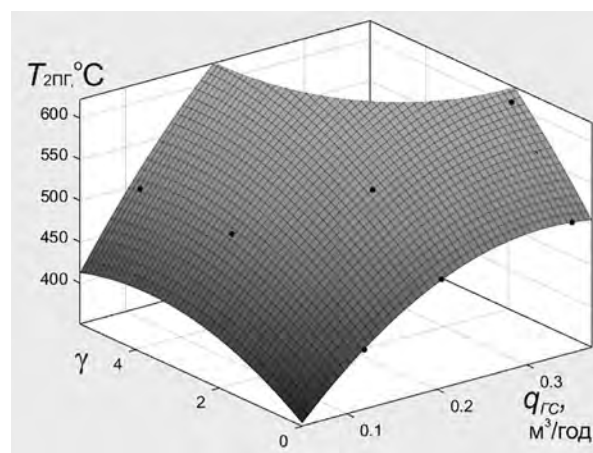


Рис. 6. Моделювання зміни температури полум'я T_2 від витрати q_{GS} природного газу та коефіцієнта γ
 Fig. 6. Simulation of the change in the flame temperature T_2 from the consumption of natural gas q_{GS} and the coefficient γ

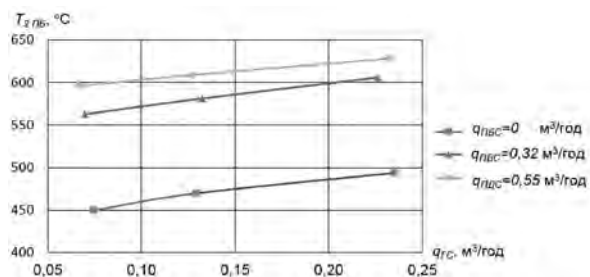


Рис. 7. Зміна температури згорання пропан-бутанової газової суміші за вимірювання термопарою $T_{2ПБ}$ залежно від її витрати $q_{ГС}$ і витрати додаткового повітря $q_{ПДС}$

Fig. 7. The change in the combustion temperature of the propane-butane gas mixture by measuring the thermocouple T_{2PG} depending on its flow q_{GS} and the flow rate of additional air q_{PDS}

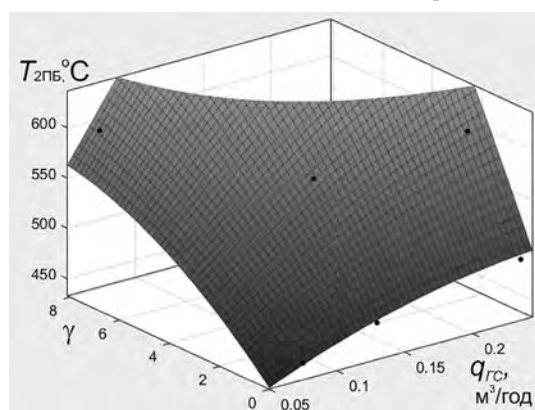


Рис. 8. Моделювання зміни температури полум'я $T_{2ПБ}$ від витрати $q_{ГС}$ пропан-бутанової газової суміші та коефіцієнта γ

Fig. 8. Simulation of the change in the flame temperature of T_{2PB} from the consumption of q_{GS} of propane-butane gas mixture and the coefficient γ

Результати експериментальних досліджень, які проведені за спалювання пропан-бутанової суміші скрапленого газу калорійністю 46,8 МДж/кг, наведено на рис. 7, а комп'ютерне моделювання за цих умов подано на рис. 8.

У цілому закономірності зміни температури полум'я є подібними до проведених досліджень на природному газі. Разом із цим температура полум'я для пропан-бутанової суміші, за однакових умов згорання, є вищою, а діапазон вимірюваних витрат парів газу є меншим, оскільки отвір сопла у пальнику горілки не змінювався.

Отримане апроксимаційне рівняння для пропан-бутанової суміші записується:

$$T_{2ПБ} = 402,6 + 704,5 \cdot q_{ГС} + 17,55 \cdot \gamma - 1257 \cdot q_{ГС}^2 + 182,2 \cdot q_{ГС} \cdot \gamma - 1,338 \cdot \gamma^2, \quad (6)$$

де $T_{2ПБ}$ — температура полум'я за згорання пропан-бутанової газової суміші, °C; $q_{ГС}$ — витрата природного газу, м³/год; γ — коефіцієнт співвідношення витрат додаткового повітря і газу, м³/м³.

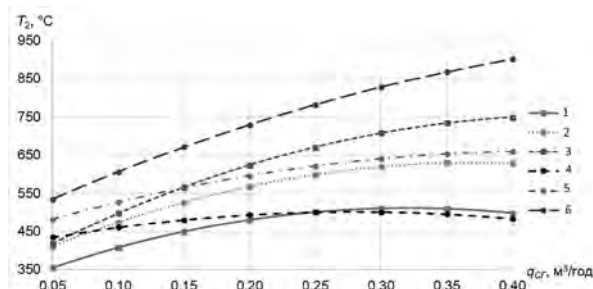


Рис. 9. Графічна ілюстрація зміни температури полум'я за спалювання природного газу (криві 1, 2, 3 за $\gamma = 0, 2, 5$ відповідно) і пропан-бутанової суміші (криві 4, 5, 6 за $\gamma = 0, 2, 5$ відповідно)

Fig. 9. Graphic illustration of the change in flame temperature for natural gas combustion (curves 1, 2, 3 for $\gamma = 0, 2, 5$ respectively) and propane-butane mixture (curves 4, 5, 6 for $\gamma = 0, 2, 5$ in accordance)

Отримані залежності (5, 6) дозволяють здійснити графічну ілюстрацію (рис. 9) впливу калорійності газу на температуру полум'я за його спалювання. Вони свідчать стосовно більшої температури полум'я пропан-бутанової суміші порівняно із температурою згорання природного газу за наявності суттєвої витрати ($\gamma = 5$) додаткового повітря, що відображають криві 3 і 6. Водночас за $\gamma = 2$ (криві 2 і 5) цей вплив є суттєво меншим, а за відсутності додаткового повітря, тобто $\gamma = 0$ (криві 1 і 4) закономірність впливу калорійності на температуру спалювання практично не виявлено. Це свідчить стосовно необхідності проведення додаткових досліджень з метою конструктивного вдосконалення пальника і вибору оптимального режиму його функціонування за контролю теплоти згорання природного газу.


ВИСНОВКИ

Здійснено вимірювання фактичної температури полум'я за умов лабораторного стенда і встановлено відмінність цієї температури полум'я від довідкових даних. Досліджено нерівномірність температури полум'я вздовж його висоти, яка може сягати до 200 °C, що виявлено вимірюванням за допомогою мініатюрного безкорпусного температурного зонда. Виявлено можливість вимірювання температури полум'я термоперетворювачами із захисними кожухами і потрібним наступним її коригуванням до фактичного значення за реалізації алгоритму методу експрес-контролю теплоти згорання природного газу. Оцінено кількісне значення методичної похибки за застосування різних термоперетворювачів із захисними кожухами, яке не перевищує $\pm 1,6$ %. Обґрунтовано можливість реалізації пристрою експрес-контролю теплоти згорання природного газу шляхом використання інформативного

параметра — температури згорання досліджуваних газів. Експериментально підтверджено зростання температури полум'я досліджуваних газів зі зростанням їх теплоти згорання. Установлено необхід-

ність подальшого дослідження оптимізаційних конструктивних характеристик пальників і робочих умов спалювання досліджуваних газів для проведення експрес-контролю їх теплоти згорання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

- ISO 15112:2007. Natural Gas — Energy determination.
- EN 1776:2015. Gas infrastructure. Gas measuring systems. Functional requirements
- ДСТУ ISO 15112:2009. Природний газ. Визначення енергії.[Чинний від 2011-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2011. 53 с. (DSTU ISO 15112: 2009. Natural gas. Determination of energy [Valid from 2011-01-01]. Kind. offic. Kyiv: State Consumer Standard of Ukraine, 2011. 53 p.).
- Власюк Я.М., Коробко І.В. (2019) Розвиток і становлення ефективних систем обліку та контролю якості природного газу. Нафтогазова галузь України (Vlasyuk Y.M., Korobko I.V. (2019) Development and development of efficient natural gas metering and quality control systems. Oil and gas industry of Ukraine). №2. — С/Р. 36—41.
- 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. (GOST 22667-82. Natural gas. Estimated method for determining combustion heat, relative density and Wobbe number. [Introduced from 1983-07-01]. Ed. offic. Moscow: Standards Publishing House, 2006. 3 p.).
- ГОСТ 30319.1-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки. [Введен с 2000-01-01]. Изд. офиц. Київ: Госстандарт Украины, 1999. 16 с. (GOST 30319.1-96. Natural gas. Methods for calculating physical properties. Determination of physical properties of natural gas, its components and products of its processing. [Introduced from 2000-01-01]. Ed. offic. Kyiv: Gosstandart of Ukraine, 1999. 16 p.).
- 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).
- Середюк О.Є., Малісевич Н.М. (2018) Аналіз патенто-захищених технічних рішень у сфері визначення теплоти згорання природного газу. Методи та прилади контролю якості. (Seredyuk O.E., Malisevich N.M. (2018) Analysis of patented technical solutions in the field of determination of natural gas combustion heat. Quality control methods and instruments) №1 (40). С/Р. 58—69.
- Спосіб оперативного визначення теплоти згорання 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. (Method of operative determination of combustion heat of gaseous fuels / Bolshakov V.I., Polevy G.A., Prokopenko P.G., Zhilka O.I.: Pat. 84975 C2 Ukraine. № а200703615; claimed 02.04.07; publ. 10.12.08; Bul. № 23. 4 p.).
- Спосіб експрес-визначення теплоти згорання 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. (A method of express determination of the combustion heat of natural gas / Karpash O.M., Darvai I.Y., Karpash M.O. [and others]: Pat. 92846 C2 Ukraine. No. а200905201; claimed 25.05.09; publ. 10.12.10; Bul. № 23. 6 p.).
- Спосіб експрес-визначення теплоти згорання 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. (A method of express determination of the heat of combustion of natural gas / Seredyuk O.E., Lyutenko T.V., Malisevich N.M.: pat. 112737 C2 Ukraine. № а201512215; claimed 09.12.2015; publ. 10/10/2016; Bul. № 19. 7 p.).
- ГОСТ Р 56021-2014. Газ горючий природный сжиженный. Топливо для двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок. Технические условия. Изд. офиц. Москва : Стандартинформ, 2014. 16 с. (GOST R 56021-2014. Natural combustible gas. Fuel for internal combustion engines and power plants. Technical conditions Ed. official Moscow: Standartinform, 2014.16 s.).
- Свойства и характеристики горючих газов (Properties and characteristics of combustible gases). Svarpost : веб-сайт. URL: <http://www.svarpost.ru/stati/54-svoystva-i-kharakteristiki-goryuchikh-gazov.html> (дата звернення: 15.02.2020).
- Термопара Ezodo TP-10. Маркет вимірювальних приладів «SIMVOLT» (Ezodo TP-10 thermocouple. SIMVOLT measuring devices market): веб-сайт. URL: <https://simvolt.ua/termopara-ezodo-tp-10.html> (дата звернення: 15.02.2020). 

Отримано / received: 01.03.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Ф.Д. Матіком (Україна).
Prof. F.D. Matiko, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.