

УДК 681.121.83

АНАЛІЗ ПАТЕНТОЗАХИЩЕНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ У СФЕРІ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОТИ ЗГОРАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ**Н. М. Малісевич, О.Є. Середюк***Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15, м.Івано-Франківськ, 76019, vitaliy_malisevych@ukr.net*

Розглянуто принципи створення, технічні можливості і особливості практичного застосування патентозахищених вітчизняних і закордонних способів і технічних рішень для визначення теплоти згорання природного газу прямим та непрямим методами. Розкрито їх технічна суть та особливості функціонування, обґрунтовано придатність до застосування в реальних умовах безпосередньо у споживачів природного газу. Запропонований патентозахищений новий спосіб для експрес-визначення теплоти згорання природного газу прямим методом. Розроблена функціональна схема пристрою для реалізації цього способу, який передбачає вимірювання температури спалюваного газу у пальнику спеціальної конструкції з використанням торцевих вимірювальних перетворювачів при витіканні досліджуваного газу в процесі спалювання. Наведено алгоритм функціонування та конструктивні особливості пристрою, які забезпечують можливість його використання як мобільного засобу для експрес-визначення теплоти згорання природного газу. Ключові слова: природний газ, теплота згорання, компонентний склад, патент, технічна реалізація, алгоритм функціонування, мобільність виконання.

Рассмотрены принципы создания, технические возможности и особенности практического применения защищенных патентами отечественных и зарубежных способов и технических решений для определения теплоты сгорания природного газа прямым и косвенным методами. Раскрыта их техническая суть и особенности функционирования, обоснована пригодность к применению в реальных условиях непосредственно у потребителей природного газа. Предложенный защищенный патентом новый способ для экспресс-определения теплоты сгорания природного газа прямым методом. Разработана функциональная схема устройства для реализации этого способа, который предусматривает измерение температуры сжигаемого газа в горелке специальной конструкции с использованием торцевых измерительных преобразователей при истечении исследуемого газа в процессе сжигания. Приведен алгоритм функционирования и конструктивные особенности устройства, которые обеспечивают возможность его использования в качестве мобильного средства для экспресс-определения теплоты сгорания природного газа. Ключевые слова: природный газ, теплота сгорания, компонентный состав, патент, техническая реализация, алгоритм функционирования, мобильность выполнения.

The principles of creation, technical capabilities and features of practical application of patented domestic and foreign methods and technical solutions for determining the calorific value of natural gas combustion by direct and indirect methods are considered. Their technical essence and peculiarities of functioning are revealed, suitability for use in real conditions directly in consumers of natural gas is substantiated. Proposed patent protected new method for express determination of calorific value of natural gas combustion by direct method. The functional scheme of the device for realization of this method is developed, which involves measuring the temperature of the combusted gas in a special design burner with the use of end-point measuring converters at the outflow of the gas under investigation in the process of combustion. The algorithm of functioning and design features of the device, which provide the possibility of its use as a mobile means for express determination of the calorific value of combustion of natural gas is presented.

Key words: natural gas, calorific value, component composition, patent, technical implementation, algorithm of functioning, mobility.

Вступ. З врахуванням світової тенденції підвищення цін на енергоносії, в тому числі на природний газ, актуальним є питання забезпечення необхідної точності вимірювань з

врахуванням нових сучасних концепцій до реалізації його обліку. Основною з них є здійснення обліку природного газу інформаційно-вимірювальними системами, які

забезпечують вимірювання не тільки використаного об'єму газу, але і враховують при цьому його теплоту згорання. Це дозволяє здійснювати облік газу в одиницях енергії і певним чином впливати на його вартість.

В Україні з 2011 р. чинним є національний стандарт [1], який регламентує методи та порядок визначення енергії під час комерційних розрахунків за спожитий газ. Однак на даний час реальне впровадження цього стандарту в повній мірі і з належною довірою споживачів є достатньо проблематичним, насамперед через відсутність простих за конструкцією і оперативних за можливістю застосування технічних засобів для визначення теплоти згорання природного газу безпосередньо за місцем його споживання.

Сьогодні набув поширення розрахунок за спожитий газ згідно з використаним його об'ємом із корекцією за теплотою згорання, яку визначають у відповідних підрозділах (хімлабораторіях) газопостачальних організацій [2], що у відповідності до чинних нормативних документів здійснюють не рідше одного разу в сім днів.

Контроль за найважливішою якісною характеристикою газу (теплота згорання) безпосередньо у споживачів не здійснюється, оскільки немає відповідних мобільних і достатньої точності засобів вимірювальної техніки. Недоліком практично всіх засобів вимірювальної техніки, які застосовуються сьогодні для обліку природного газу, є вимірювання ними тільки об'єму газу як комерційного параметра.

Тому вивчення відомих методів та пристроїв для визначення теплоти згорання природного газу є актуальною задачею, оскільки відкриває шляхи до вдосконалення існуючих та розроблення принципово нових засобів. Їх застосування дозволить більш раціонально використовувати енергетичні ресурси, підвищити економічну ефективність діяльності підприємств і водночас поєднувати національні підходи з європейськими у сфері обліку природного газу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Однією із основних якісних характеристик природного газу є його теплота згорання, що характеризується кількістю енергії, яка виділяється в результаті згорання в повітрі певної кількості газу.

Згідно з стандартом [1] для визначення теплоти згорання природного газу можна застосовувати прямі і 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 [3, 4], 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. Останнім часом вони також застосовуються у складі витратовимірювальних комплексів газовимірювальних станцій [5] як складові вузли для визначення густини природного газу при практичній реалізації методу змінного перепаду тиску.

Однак застосування хроматографічного методу для визначення теплоти згорання природного газу можливе лише на великих пунктах обліку природного газу за умов наявності цього достатньо дорогого обладнання і не може бути реалізоване при виконанні вимірювань безпосередньо у промислових чи побутових споживачів.

Принцип дії і основи технічної реалізації засобів для вимірювання якісних характеристик природного газу подані в довіднику [6]. Однак в ньому практично не наведені конкретні апаратні рішення засобів контролю якісних характеристик природного газу.

Вивченню технологій та засобів для експрес-контролю теплоти згорання природного газу присвячена стаття [7], в якій виконаний аналіз серійних і дослідних вітчизняних і закордонних засобів вимірювання і особливості їх застосування для різних методів визначення теплоти згорання. В цій статті дуже обмежено розглянуто новітні, в тому числі запатентовані, технічні рішення у сфері контролю і визначення теплоти згорання природного газу.

Метою роботи є аналіз патентозахищених технічних рішень для практичної реалізації методів визначення теплоти згорання природного газу.

Виклад основного матеріалу.

Одним із досить давно відомих є спосіб визначення теплоти згорання горючих газів [8], який полягає у вимірюванні температури полум'я пальника при згоранні суміші

постійного об'ємного співвідношення досліджуваного газу з повітрям. Схема технічного рішення для реалізації цього способу (рис. 1) містить пальники 1 і 2, вхідний газовий 12 та повітряний 15 патрубки, повітряну лінію 16, газову лінію 10, капілярні трубки 14, 17, 8 і 9 для обмеження витрати газу та повітря, серво-клапан 13 з контролером 15 для регулювання витрати горючого газу, термопари 3 і 4 для вимірювання температури полум'я на пальниках, звукувальний пристрій 6 для забезпечення постійної різниці співвідношення повітря-газ в двох пальниках, електромагнітний клапан 13, контролер 18, реєструючий пристрій 19, турбінний витратомір 7.

При реалізації цього способу спочатку за допомогою двох пальників спалюють досліджуваний газ разом з газом-носієм, що підтримує горіння, вимірюючи температуру полум'я і витрату досліджуваного газу за допомогою турбінного витратоміра. Потім досліджуваний газ змішують в одній лінії з газом-носієм і подають в обидва пальники, регулюючи витрату таким чином, щоб досягнути максимальної температури полум'я в пальниках. На основі отриманих даних щодо об'ємного співвідношення витрат газів, за яких досягається максимальна температура полум'я, розраховують теплоту згорання досліджуваного газу.

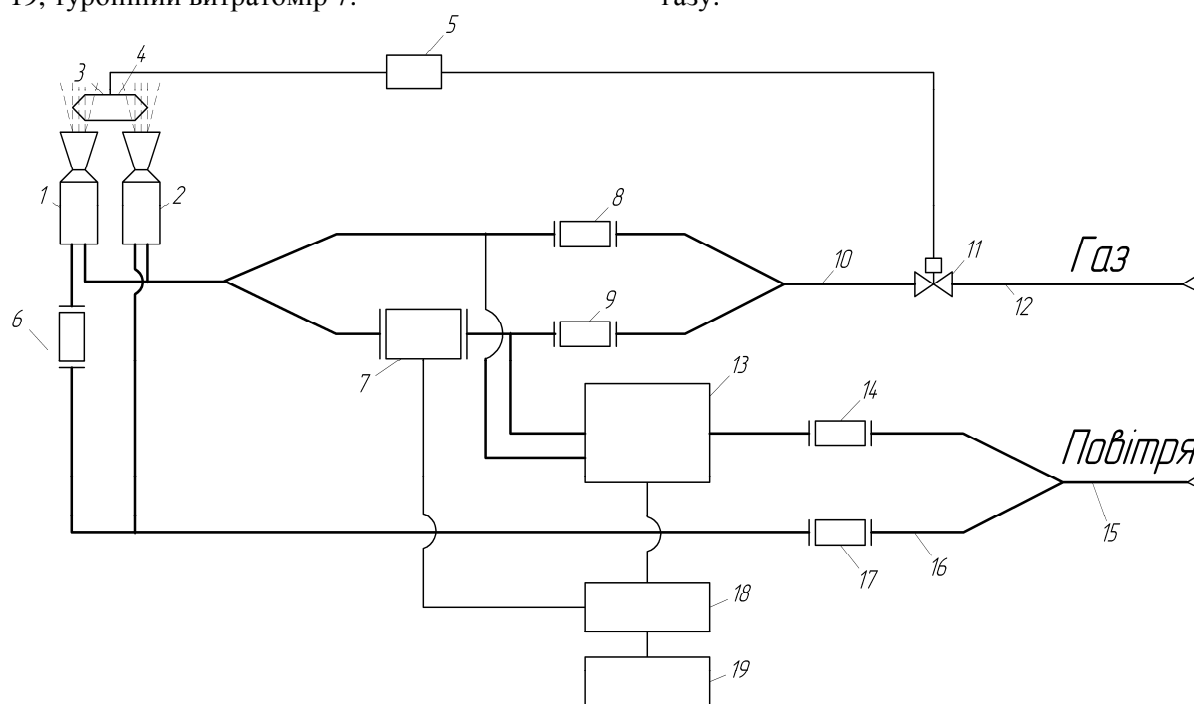


Рисунок 1 – Схема пристрою для визначення теплоти згорання горючих газів

Проте цей спосіб вимагає двоетапності практичної реалізації і, як наслідок, тривалості проведення досліджень. Крім того, цей спосіб характеризується складністю технічної реалізації внаслідок необхідності застосування двох спеціальних ідентичних пальників, турбінного витратоміра, системи керування вентиллями і електромагнітним клапаном для регулювання співвідношення витрат досліджуваного газу і газу-носія, що обумовлює недостатню точність і повторюваність результатів вимірювання, оскільки визначення моменту максимальної температури полум'я є оптимізаційною характеристикою, яка потребує поетапного регулювання в сторону збільшення і

зменшення об'ємного співвідношення газів для зміни температури полум'я пальників.

Відомий також запатентований мікрокалориметр для вимірювання теплоти згорання природного газу [9]. Він включає в себе блок 4 (рис.2), що керує потоком, в який вводять досліджувані гази для проведення аналізу. Мікрокалориметр містить камеру згорання 6, в якій зразки газу пропускають через давач 8, в якому здійснюється окислення зразків газу та генерація аналітичного сигналу. Засіб обробки сигналу підключено до вихідного сигналу 7 давача 8 для приймання інформативного сигналу та обчислення теплоти згорання зразкового газу. Після окислення газу

утворену суміш випускають в атмосферу через патрубок 9 в камері згорання 6.

Під час роботи в блок 4 вводять калібрувальний газ 3 відомої теплоти згорання або пробний газ 1 з невідомою теплою згорання, де його змішують з газом-носієм 2, як правило, повітрям, перед контактом з давачем 8, який нагрівається до температури експлуатації. Блок 4 вводить точний заздалегідь визначений об'єм пробного газу або калібрувального газу в потік газу-носія. Отримана суміш 5 потрапляє в камеру згорання 6, де каталітично окислюється нагрітим давачем 8. Реакція окислення виробляє

тепло, що викликає зміну температури давача 8. Зміна температури прямо пропорційна виділеній теплоті і використовується для визначення теплоти згорання зразка газу.

Калібрування давача 8 здійснюється при певній температурі та тиску навколишнього середовища, тому точність калориметра є досить високою через зменшення ефекту коливаний умов навколишнього середовища. Мікрокалориметр може включати давачі температури та тиску, що дозволяє при зміні умов навколишнього середовища вводити корекційний коефіцієнт.

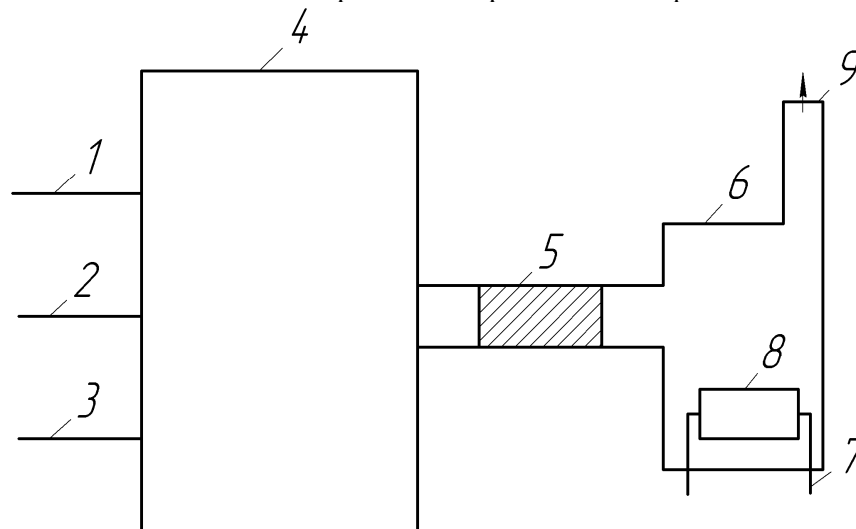


Рисунок 2 – Блок-схема мікрокалориметра для вимірювання теплоти згорання природного

Застосування описаного пристрою для визначення теплоти згорання природного газу вимагає використання калібрувального газу та газу-носія, що ускладнює його використання як мобільного засобу при експрес-визначенні теплоти згорання газу, а точність функціонування як високоточного в патенті не конкретизується.

Калориметричний спосіб прецизійного вимірювання теплоти згорання природного газу [10] реалізується прямим методом шляхом спалювання газоподібного палива в калориметричній посудині. При цьому теплова енергія, що виділилась під час горіння використовується для повного плавлення введеної в посудину калориметричної речовини. Процес плавлення проводять в заданому температурному інтервалі, симетричному щодо температури плавлення калориметричної речовини, підтримуючи при цьому температуру оболонки калориметра рівною температурі плавлення калориметричної речовини. Теплота згорання газоподібного палива дорівнює тепловій енергії, необхідної для нагрівання

калориметричної речовини в заданому температурному інтервалі і встановленої в процесі електричного градування калориметра.

Технічне рішення для реалізації способу (рис. 3а,б) містить калориметричну посудину 1, наповнену калориметричною речовиною відомої кількості 2. У калориметричній посудині розміщена камера згорання 3 з електродами 4 для запалювання газу, яка забезпечена системою трубопроводів для подачі газу 5, первинного кисню 6, вторинного кисню 7, аргону 8. Для подачі газів в камеру згорання передбачені електронні регулятори витрати газу 9-12, посудини 13 для насичення кисню водою і посудини 14 для запобігання попадання води в регулятори витрати кисню. У термостатичній оболонці 15 (водяний термостат) розміщені чотири спіралі 16. Калориметр містить два платинових термометри опору 17 і 18 і два електричних нагрівачі 19 і 20. Нагрівач 20 розміщений в калориметричній посудині 1, а нагрівач 19 у водяному термостаті 15. Крім того термостат 15 обладнаний мішалкою 21. Між

калориметричною посудиною 1 і термостатичною оболонкою 15 розташований масивний блок 22 з металу з високою теплопровідністю. Калориметрична посудина 1 закрита кришкою 23, що має пази для трубопроводів 5-8 і кінці електричних провідників до блоку управління і вимірювання 24. Між металевим блоком 22 і зовнішньою стінкою калориметричної посудини 1 розміщена батарея диференційних термопар 25. Трубки 26 призначені для виведення продуктів згорання в камеру для збору конденсату 27. Трубка 28 служить для виходу газоподібних продуктів згорання з калориметра.

Теплоту згорання природного газу визначають таким чином. Калориметричну посудину 1 заповнюють рідкою евтектикою 2 так, що вона повністю покриває камеру згорання 3. Потім калориметричну посудину 1 охолоджують в холодильнику до повної кристалізації евтектики 2. Після цього калориметричну посудину 2 виймають з холодильника і витримують при кімнатній температурі близько однієї години, поки калориметрична посудина 1 не прийме температуру навколишнього середовища, але не більше 24°C.

Температура водяного термостата 15 встановлюється рівною температурі плавлення евтектики (25,2°C) і підтримується постійною з похибкою $\pm 0,002^\circ\text{C}$. Поміщають калориметричну посудину з твердою евтектикою в термостат.

За допомогою термометра опору 18, що знаходиться в хорошому тепловому контакті з калориметричною речовиною 2, реєструють температуру калориметричної посудини 1. За допомогою електричного нагрівача 20 доводять температуру калориметричної посудини 1 до 25°C і починають вимірювання різниці температур між калориметричною посудиною 1 і термостатом 15 за допомогою батареї диференційних термопар 25.

Як тільки встановиться постійний хід температури калориметричної посудини, що свідчить про досягнення стаціонарного стану, і температура калориметричної посудини 1 (T_1) буде на 0,1°C нижче температури плавлення евтектики 2, фіксують величину різниці температур, виміряну батареєю термопар 25, і подають за допомогою електричного нагрівача 20 постійну електричну потужність близько 30 Вт, яку вимірюють з похибкою, що не перевищує 0,01%. Подачу електричної потужності продовжують до тих пір, поки різниця температури, що реєструється батареєю термопар, не досягне того ж вихідного значення,

але протилежного знаку, тобто температура рідкої евтектики стане вище температури плавлення евтектики на 0,1°C. Визначають величину електричної енергії Q , витраченої на плавлення всієї калориметричної речовини 2 і нагрів калориметричної посудини від початкового значення (T_1), що знаходиться на 0,1°C нижче температури плавлення калориметричної речовини 2, до її кінцевого значення (T_2), що перевищує температуру плавлення на 0,1°C.

Значення питомої теплоти згорання H досліджуваного природного газу з врахуванням визначеної теплової енергії Q та відомої маси евтектики m розраховують за формулою:

$$H = \frac{Q}{m}. \quad (1)$$

Технічна реалізація даного способу вимагає використання холодильної установки, забезпечення сталих нормованих лабораторних умов, а проведення експериментальної частини вимірювань займає тривалий відрізок часу. Тому такий спосіб є достатньо складним конструктивно і не підходить для реалізації в мобільних пристроях експрес-визначення теплоти згорання природного газу.

Пристрій [11] дозволяє визначати теплоту згорання природного газу непрямим методом шляхом визначення теплопровідності його компонентів. Згідно з схемою (рис. 4 а) пристрій містить балони 1, 5, 8, 11 з різними компонентами природного газу, регулятори тиску кожного каналу 3, 7, 10, 13, контролери швидкості потоку для кожного каналу 3А, 3В, 3С, 3Д, вимірювальний трубопровід 4 системою визначення теплоти згорання природного газу. Чутливим елементом системи визначення теплоти згорання природного газу (рис. 4 б) є електронний чип, що дозволяє визначати теплопровідність робочого середовища. До його складу входять нагрівальний елемент 16, елементи для визначення температури 15 і 17, теплоізолятор 14, ізоляційна плівка 19, вимірювальна порожнина 18.

Виконання вимірювань починають з пропускання через вимірювальний трубопровід 4 досліджуваного природного газу. За допомогою чутливого елемента системи визначення теплоти згорання природного газу визначають теплопровідність досліджуваного газу шляхом вимірювання температури та електричної потужності нагрівального елемента. Після цього вимірювальний трубопровід 4 продувають, видаляючи з нього і чутливого елемента досліджуваний газ. Далі у вимірювальному трубопроводі 4 почергово

формують різні компонентні склади природного газу шляхом змішування досліджуваного газу з газами з балонів 1 за допомогою регуляторів тиску 2 і контролерів витрати 3. Для кожного складу газу визначають його теплопровідність. В результаті проведення певної кількості дослідів отримують ряд значень теплопровідності для різних компонентних

складів. Використовуючи теорію багатовимірного аналізу та елементи нечіткої логіки при обробці отриманих експериментальних значень визначають теплоту згорання досліджуваного природного газу розрахунковим методом.

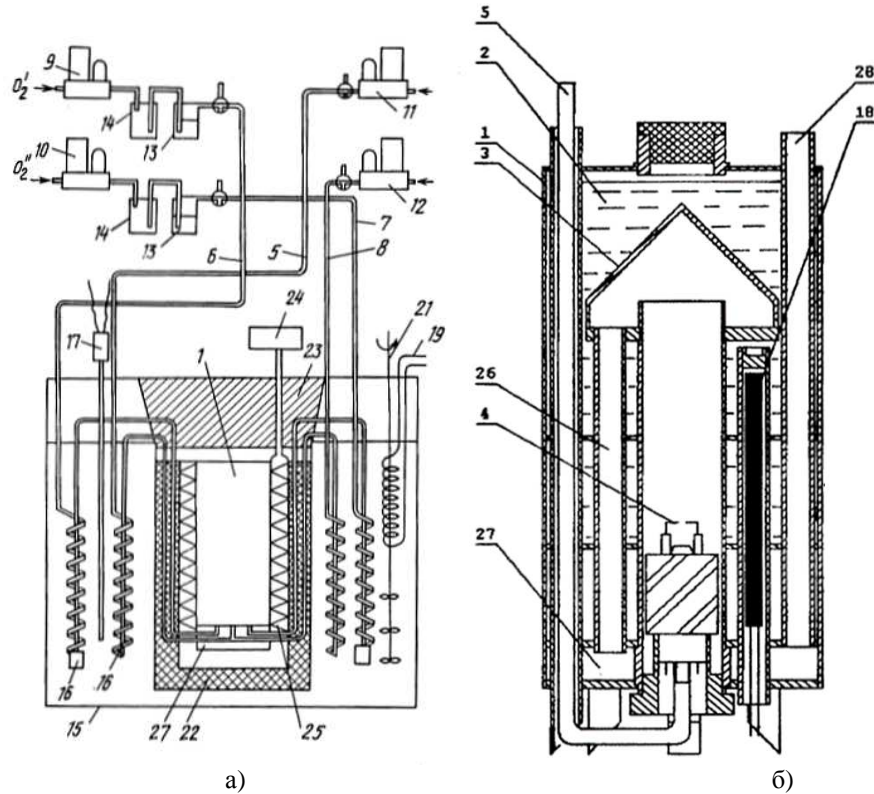


Рисунок 3 – Функціональна схема (а) та конструкція калориметричної посудини (б) для технічної реалізації способу прецизійного вимірювання теплоти згорання природного газу

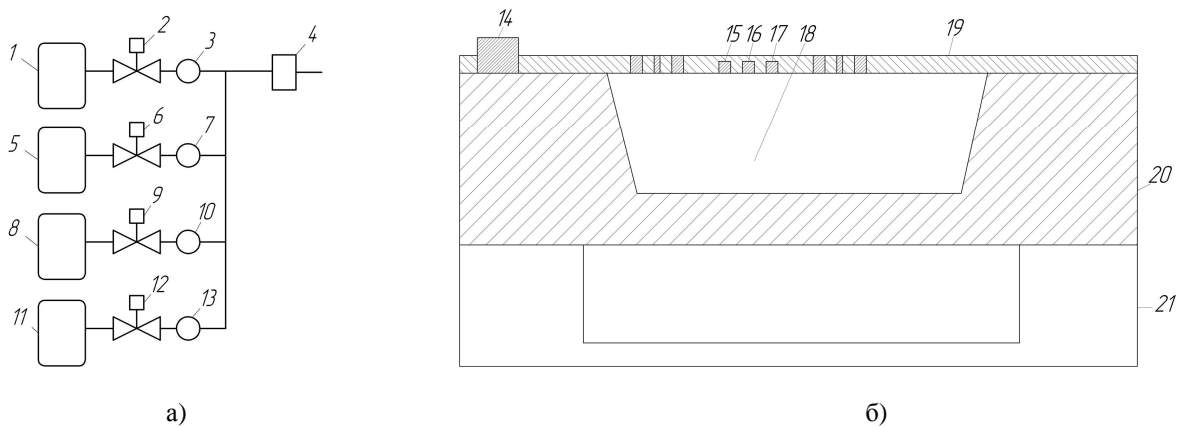


Рисунок 4 – Функціональна схема (а) та конструкція чутливого елемента (б) пристрою для визначення теплоти згорання природного газу

Проте даний спосіб визначення теплоти згорання природного газу є складним у реалізації, вимагає застосування дороговартісних давачів та системи обробки інформації в поєднанні з складним математичним апаратом. Практично це унеможливило використання такого методу у споживачів природного газу.

Відомий спосіб визначення теплоти згорання природного газу природних вуглеводневих горючих газів [12], метою якого є скорочення витрати часу на визначення теплоти згорання газу. Спосіб полягає в послідовному спалюванні в однакових умовах в полум'ї іонізаційного детектора газового хроматографа в потоці інертного газу-носія однакових об'ємів калібрувального і досліджуваного газу з реєструванням хроматограм. При спалюванні досліджуваного газу через час t після введення проби в хроматографічну колонку, визначеного умовою $1 \text{ хв.} \leq t \leq t_0$ (t_0 – час початку виходу метану), змінюють напрям руху газу-носія на протилежний, в результаті чого реєструють один загальний пік досліджуваного газу без розділу на компоненти. Теплоту згорання досліджуваного газу Q визначають за табличним значенням теплоти згорання калібрувального газу Q_k і вимірних площ піків досліджуваного S_n і калібрувального S_k газу використовуючи формулу:

$$Q = Q_k \frac{S_n}{S_k}. \quad (2)$$

Цей спосіб потребує застосування хроматографа, тому не може слугувати як експрес-контроль у споживачів природного газу.

Спосіб [13] оперативного визначення теплоти згорання газоподібних палив базується на використанні явища іонізації полум'я і передбачає вимірювання за допомогою електричного зонду струму іонізації полум'я мікропальника, який підключений до ліній подачі газу і повітря. Особливість способу полягає в тому, що шляхом зміни витрати подаваного в мікропальник повітря знаходять максимум іонізації полум'я, фіксують відповідні до цього максимуму витрати газу $Q_r(\max)$ і повітря $Q_{\text{п}}(\max)$ і при цьому обчислюють коефіцієнт їх співвідношення:

$$K = \frac{Q_{\text{п}}(\max)}{Q_r(\max)}. \quad (3)$$

За величиною коефіцієнта K визначають теплоту згорання газоподібних палив за формулою:

$$P = 3,71 \cdot K + 1,17, \quad (4)$$

де P – теплота згорання палива, МДж/м³.

Конструктивно пристрій для реалізації такого способу містить газовий мікропальник 1 (рис. 5), який під'єднаний з однієї сторони до газового балону 2 (на реальному об'єкті – до лінії подачі газу) через лічильник газу 3 і ротаметр 4. З іншого боку мікропальник 1 з'єднаний з компресором 5 через лічильник повітря 6 і ротаметр 7. Імпульси від первинних давачів лічильників газу 3 і повітря 6 надходять на входи перетворювачів 8 і 9 цих лічильників у дискретні електричні сигнали, частота проходження яких пропорційна витратам газу й повітря відповідно. Арифметико-логічний пристрій 10 на основі цих сигналів здійснює розрахунок коефіцієнта співвідношення газ-повітря, а результат виводиться на інформаційне табло 11.

У полум'ї 12 мікропальника 1 розміщений двоелектродний зонд 13, який призначений для вимірювання ступеня іонізації полум'я. Електричний сигнал зонда через блок 14 первинної обробки керуючого сигналу надходить на вимірювальний прилад 15, призначений для візуального контролю ступеня іонізації полум'я, і на вхід аналого-цифрового перетворювача 16, підключеного до входу обчислювального пристрою 17 (мікроконтролера).

Цей пристрій хоча і може бути застосовний для оперативного визначення теплоти згорання природного газу у споживачів, однак є технічно складним у конструктивному виконанні. Відомими є ряд способів і технічних рішень для експрес-визначення теплоти згорання природного газу [14-16], який дозволяє проводити вимірювання в режимі реального часу на базі вимірювання швидкості проходження ультразвукових коливань в природному газі. До його складу входять вхідний запірний пристрій 10, блок підготовки газу 1, з'єднаний з вимірювальною камерою 2, вихідний запірний пристрій 11, блок обробки даних 4, індикатор 5. У вимірювальній камері 2

розміщені датчик концентрації діоксиду вуглецю 3, датчик тиску 6, датчик вологості 7, датчик температури 8 і датчик швидкості ультразвуку 9.

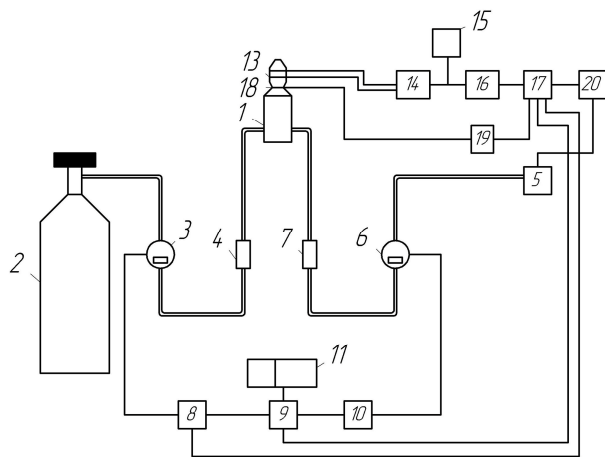


Рисунок 5 – Загальний вигляд пристрою, який реалізує спосіб оперативного визначення теплоти згорання природного газу

Для визначення теплоти згорання природного газу за його компонентним складом у пристрої передбачено вимірювальну камеру, де вимірюють швидкість проходження ультразвукових коливань у газі. Вона має кореляційний зв'язок із вмістом вуглеводневих компонентів у компонентному складі природного газу. При цьому кореляційний зв'язок швидкості ультразвуку від компонентного вмісту азоту і вуглекислого газу є слабким, що приводить до необхідності попереднього визначення концентрації азоту та вуглекислого газу в компонентному складі природного газу. Для визначення вмісту вуглекислого газу можливе використання газоаналітичної техніки, а вміст азоту розраховують, як різницю 100 %, вмісту вуглеводневих компонентів та вуглекислого газу. Перед вимірюванням концентрації вуглекислого газу в природному газі його очищають від механічних домішок та осушують. Крім того в процесі визначення теплоти згорання природного газу вимірюють також його тиск, температуру та вологість. Для розрахунку теплоти згорання природного газу за результатами вимірювань використовують спеціально розроблену штучну нейронну мережу.

Цей спосіб передбачає необхідність попереднього визначення вмісту азоту в природному газі, що є достатньо складним технічним завданням, оскільки реалізація способу вимагає застосування дороговартісних засобів вимірювання, особливо для вимірювання вмісту діоксиду вуглецю, що робить реалізацію способу великозатратною у вартісному аспекті. Поряд з цим цей спосіб придатний для вимірювання теплоти згорання тільки сухого газу, оскільки алгоритм реалізації способу не передбачає врахування вмісту вологості в природному газі, що потребує додаткових затрат при здійсненні осушування газу при його підготовці до визначення теплоти згорання. Крім того, використання алгоритму штучних нейронних мереж для реалізації способу потребує спеціальних знань і відповідного інтелектуального потенціалу обслуговуючого персоналу, що ускладнює можливість його практичного застосування.

За участю авторів запропонований новий спосіб для експрес-визначення теплоти згорання природного газу [17], який базується на вимірюванні температури спалюваного у пальнику газу. При реалізації способу забезпечується згорання суміші постійного об'ємного співвідношення досліджуваного газу з повітрям із застосуванням у конструкції пальника інжекторного забірного пристрою навколишнього повітря і проградуйованого по витраті торцевого звужувального пристрою, через який здійснюється витік газу для спалювання.

Пристрій для експрес-визначення теплоти згорання природного газу (рис. 6) містить пальник 1 з торцевим звужувальним пристроєм 2 подачі природного газу і інжекторним забірним пристроєм повітря з навколишнього середовища 3. Вхідний патрубок пальника 1 приєднано до технологічного вузла 4 регулювання надлишкового тиску і вимірювання температури, густини і вологості природного газу, який в свою чергу приєднаний через кран подачі газу 5 до лінії подачі газу 6. Технологічний вузол 4 містить пристрій регулювання надлишкового тиску 7 і перетворювачі тиску 8, температури 9, густини 10 і вологості 11 природного газу, які через відповідні узгоджуючі пристрої під'єднані до ПЕОМ 12. Перетворювачі температури полум'я пальника 13, тиску 14, температури 15 і вологості 16 також через відповідні узгоджуючі пристрої під'єднані до ПЕОМ 12.

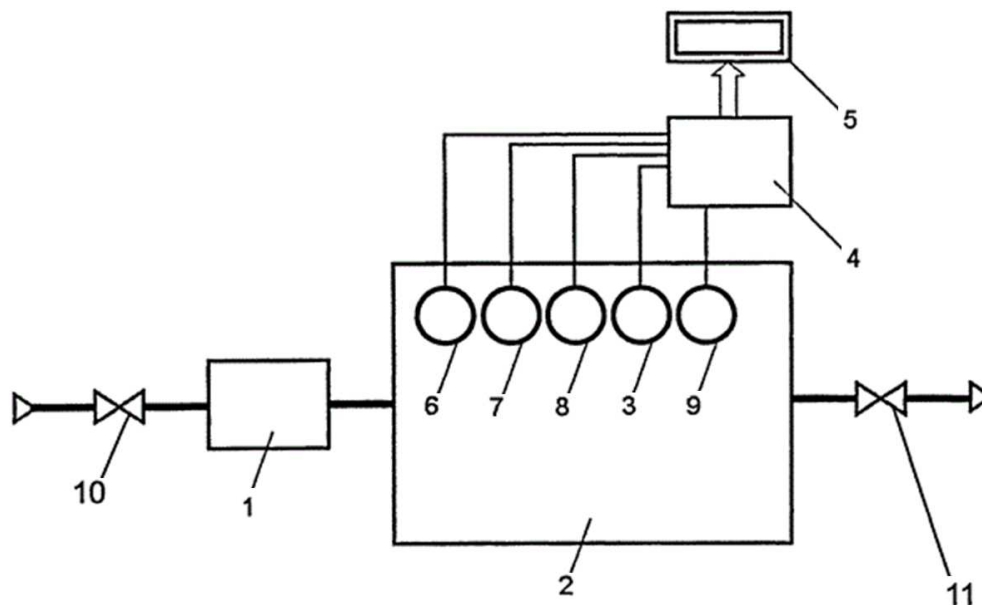


Рисунок 6 – Функціональна схема пристрою для визначення теплоти згорання природного газу

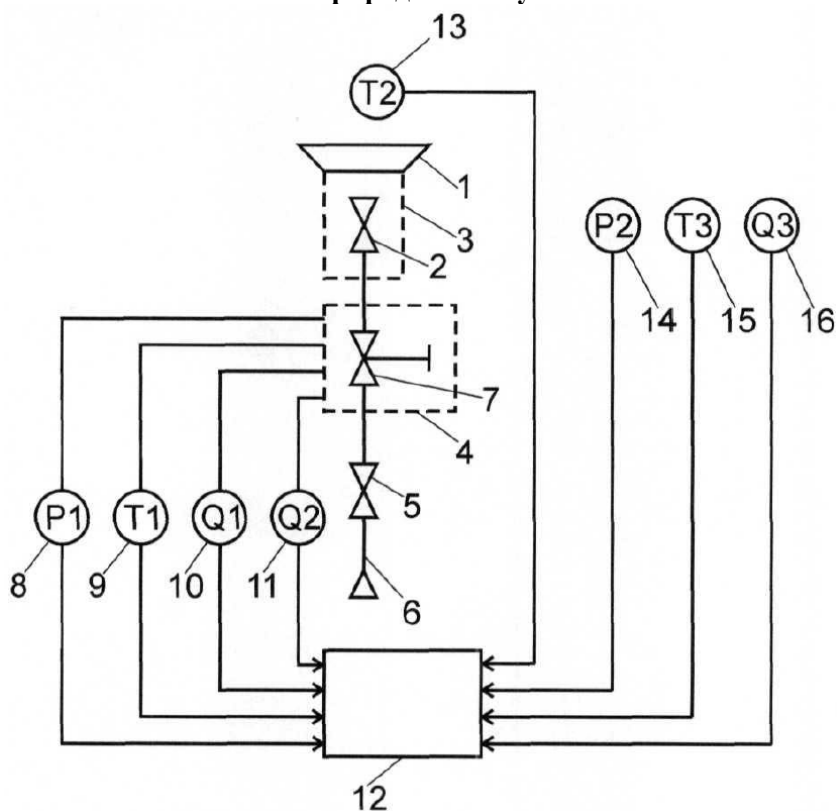


Рисунок 7 – Функціональна схема пристрою експрес-визначення теплоти згорання природного газу

Спосіб експрес-визначення теплоти згорання природного газу здійснюють таким чином. Перед проведенням вимірювань за реальних умов здійснюють попереднє калібрування пальника 1, на якому проводять експрес-визначення теплоти згорання природного газу пропонованим способом. Для цього під'єднують до джерела природного газу з відомою його теплою згорання лінію подачі природного газу 6 до пальника 1 через технологічний вузол 4 регулювання надлишкового тиску і вимірювання температури, густини і вологості природного газу. Далі відкривають кран подачі газу 5 до пальника 1 і запалюють пальник 1. Наступною операцією встановлюють з використанням ПЕОМ 12, щонайменше на трьох сумішах 5 природного газу відомої теплоти згорання, залежність між відомим значенням теплоти згорання природного газу і температурою полум'я з урахуванням виміряних значень надлишкового тиску, температури, густини і вологості природного газу і виміряних значень тиску, температури і вологості повітря навколишнього середовища.

При цьому об'єм природного газу, що проходить через торцевий звужувальний пристрій для 10 визначення його об'ємної теплоти згорання, розраховують за формулою:

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

де q_c – об'ємна витрата газу через звужувальний пристрій, м³/с; α – коефіцієнт витрати звужувального пристрою; ϵ – поправний множник на розширення газу; d – діаметр отвору звужувального пристрою пальника; Δp – перепад тиску на звужувальному пристрої; 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 звужувального пристрою відповідно.

При функціонуванні пристрою визначають теплоту згорання H_c природного газу за стандартних умов за формулою:

$$H_c = \frac{(A \cdot T - B \cdot K_i \cdot \phi \cdot q_c \cdot \tau)}{q_c \cdot \tau}, \quad (6)$$

де A – коефіцієнт конструктивного виконання пальника; T – температура полум'я пальника; B – коефіцієнт теплоти випаровування вологи повітря; K_i – коефіцієнт інжекції інжекторного

пристрою пальника; ϕ – відносна вологість повітря навколишнього середовища; q_c – об'ємна витрата газу через торцевий звужувальний пристрій за стандартних умов; τ – тривалість пропуску об'єму газу через пальник.

Значення коефіцієнта конструктивного виконання пальника A визначають під час попереднього калібрування пристрою експрес-визначення теплоти згорання щонайменше на трьох сумішах природного газу відомої теплоти згорання, як функцію від робочих параметрів згорання природного газу.

При проведенні експрес-визначення теплоти згорання, безпосередньо пропонованим способом, під'єднують джерело досліджуваного природного газу до лінії його подачі 6 до попередньо прокаліброваного пальника 1, скомпонованого з інжекторним забірним пристроєм 3 забору навколишнього повітря і проградуєваним по витраті торцевим звужувальним пристроєм 2, через технологічний вузол 4 регулювання надлишкового тиску і вимірювання температури, густини і вологості природного газу. Далі відкривають кран 5 подачі газу до пальника і запалюють пальник. Після цього вузлом регулювання 7 регулюють до необхідного значення перепад тиску природного газу на звужувальному пристрою 2 пальника 1 і вимірюють температуру полум'я давачем 13. Після цього вимірюють температуру, густину і вологість природного газу давачами 9, 10, 11 і параметри повітря навколишнього середовища (тиск, температура, вологість) давачами 14, 15 і 16 відповідно.

Далі за попередньо визначеними для даного пальника значенням коефіцієнта конструктивного виконання A за формулами (5) і (6) здійснюють розрахунок теплоти згорання досліджуваного природного газу.

Новий підхід до забезпечення постійного об'ємного співвідношення досліджуваного газу і повітря при згоранні суміші з одночасним врахуванням робочих параметрів компонентів суміші обґрунтовується здійсненням вимірювань із застосуванням у конструкції пальника інжекторного забірної пристрою навколишнього повітря, яким забезпечують досягнення постійного об'ємного співвідношення досліджуваного газу з повітрям, а також завдяки забезпеченню умови дотримання постійного перепаду тиску до і після торцевого звужувального пристрою, проградуєваного по витраті, що в комплексі дозволяє точніше вимірювати витрату природного газу, який подається на спалювання,

і саме цим досягають підвищення точності визначення теплоти згорання природного газу. Крім того, завдяки тому, що в звужувальному пристрою відсутні рухомі елементи, спрощено технічну реалізацію запропонованого способу.

Технологічним вузлом регулювання надлишкового тиску і вимірювання при цьому температури, густини і вологості природного газу забезпечують стабільність і постійність умов згорання суміші при визначенні теплоти згорання природного газу шляхом задання необхідного і постійного перепаду тиску на торцевому звужувальному пристрою, що в свою чергу сприяє підвищенню точності реалізації способу вимірювання.

Використання повітря як газу-носія для підтримання горіння спрощує технічну реалізацію способу, оскільки не вимагає застосування спеціального газу-носія, а визначення і врахування параметрів повітря навколишнього середовища (температура, атмосферний тиск, вологість) дає можливість їх врахування при визначенні теплоти згорання, чим досягається підвищення точності визначення теплоти згорання.

Підвищенню точності визначення теплоти згорання сприяє також врахування вологості природного газу шляхом її вимірювання.

Реалізацію способу експрес-визначення теплоти згорання забезпечують попередньо встановленою експериментальною залежністю між теплотою згорання природного газу і температурою полум'я пальника за відомих значень робочих параметрів і калорійності природного газу і відомих значень тиску, температури, вологості навколишнього середовища.

Застосування коригування результатів визначення теплоти згорання до стандартних умов з урахуванням коефіцієнта конструктивного виконання пальника, який визначають під час попереднього калібрування пальника, на якому проводять вимірювання, щонайменше на трьох сумішах природного газу відомої теплоти згорання, як функцію від робочих параметрів згорання природного газу, забезпечує можливість проведення експрес-визначення теплоти згорання практично за будь-яких умов навколишнього середовища і за вимірних значень параметрів природного газу (тиск, температура, густина, вологість) перед звужувальним пристроєм пальника. При цьому проведення попереднього калібрування пальника щонайменше на трьох сумішах природного газу відомої теплоти згорання дозволяє враховувати особливості функціонування пальника на різних сумішах

природного газу, що виключає можливість випадкового впливу конструктивних особливостей пальника і недостовірності вимірювань із забезпеченням необхідної точності вимірювання і допустимої величини похибки.

Висновки: За результатами досліджень підтверджено актуальність і доцільність вдосконалення методів і технічних засобів для визначення теплоти згорання природного газу. Здійснений аналіз перспективних нових патентозахищених вітчизняних і закордонних способів і пристроїв для вирішення цього завдання.

Встановлено, що тенденції розвитку засобів вимірювання теплоти згорання природного газу стосуються не тільки прецизійних високоточних калориметрів, але і засобів для експрес-контролю теплоти згорання природного газу безпосередньо у газоспоживачів.

Актуальними для впровадження є практично всі проаналізовані способи і пристрої вимірювання теплоти згорання природного газу, однак сфера їх застосування повинна бути техніко-економічно обгрунтована внаслідок суттєвої різниці між ними в складності технічної реалізації, рівнях метрологічної точності функціонування і умовах застосування згідно поставлених завдань при вимірюванні якісних характеристик природного газу.

Запропонований авторами патентозахищений новий спосіб для визначення теплоти згорання природного газу характеризується реалізацією прямого методу вимірювання і достатньою простотою конструкції. Цей спосіб підвищує точність і достовірність визначення теплоти згорання природного газу з можливістю його реалізації безпосередньо у газоспоживачів, що сприяє суттєвій економії затрат на проведення вимірювань без матеріально затратних операцій відбору проб природного газу і їх транспортування до відповідних лабораторій з контролю якості природного газу. Спосіб дозволяє визначати теплоту згорання одоризованого природного газу, що при застосуванні хроматографічного методу аналізу є недопустимим, і вимірювати теплоту згорання вологого природного газу будь-якого компонентного складу, в тому числі за наявності неуглеводневих компонентів із забезпеченням необхідної точності вимірювання і допустимої величини похибки.

1. *Природний газ. Визначення енергії: ДСТУ ISO 15112:2009. – [Чинний від 2011-01-01]. – К.:*

Держспоживстандарт України, 2010. – 48 с. – (Національний стандарт).

2. Як це працює. Енергетичні одиниці замість кубометрів газу // <https://104.ua/ua/analytics/id/jak-ce-pracjuje.-energetichni-odinici-zamist-kubom-21751>

3. Газы горючие природные. Расчетный метод определения теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе: ГОСТ 22667-82. – [Введен с 1983-07-01]. – М.: Изд-во стандартов, 2006. – 3 с. – (Межгосударственный стандарт).

4. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки: ГОСТ 30319.1-96. – [Введен с 2000-01-01]. – К.: Госстандарт Украины, 1999. – 16 с. – (Межгосударственный стандарт).

5. Розгонюк В.В. ГВС "Гребеники" – газовимірювальна станція 2005 року / В.В. Розгонюк, Я.М. Власюк // *Нафтова і газова промисловість*. – 2003. – № 3. – С. 50-51.

6. Облік природного газу: довідник / [М.П. Андрійшин, 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.

7. Яворський А.В. Огляд сучасного стану технологій та розробок для експрес-контролю теплоти згорання природного газу / А.В. Яворський, І.Р. Ващишак, І.І. Височанський, М.О. Карпаш // *Методи та прилади контролю якості*. – 2016. – № 37. – С. 51-66.

8. Пат. US 4062236, МПК G 01 N 25/30. Method of and means for accurately measuring the calorific value of combustible gases / William H. Clingman, Jr.; заявник і патентовласник Precision Machine Products, Inc., Dallas, Tex. – № 682578; опубл. 03.05.1976.

9. Пат. US 5494826, МПК G 01 N 25/20. Microcalorimeter sensor for the measurement of heat content of natural gas / Joseph R. Stetter, G. Jorgan Maclay; заявник і патентовласник Gas Research Institute, Inc. – № 228906; опубл. 18.04.1994.

10. Пат. RU 2169361, МПК (2000.01) G01N 25/22. Калориметрический способ прецизионного измерения теплоты сгорания природного газа и других видов газообразного топлива / Александров Ю.И., Беяков В.И.; заявник і патентовласник Государственное унитарное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева". – № 99124710/28; заявл. 22.11.1999; опубл. 20.06.2001; Бюл. № 17.

11. Пат. JP 2013205109, МПК G01N 25/18. Natural gas heating value measuring system, and calibration method of natural gas heating value measuring system / Oishi Yasuharu; заявник і патентовласник Azbil Corp. – № 2012072277; заявл. 27.03.2012; опубл. 07.10.2013.

12. Пат. SU 1693504 A1, МПК⁵ G01N25/22. Спосіб визначення теплоти згорання природних вуглеводневих горючих газів / Замулинский И.М., Здановский В.Г. – № 4693191/25; заявл. 19.05.1989; опубл. 23.11.1991; Бюл. № 43.

13. Пат. 84975 С2 Україна, МПК (2006.01) G01N25/22. Спосіб оперативного визначення теплоти згорання газоподібних палив / Большаков В.І., Полевий Г.А., Прокопенко П.Г., Жилка О.І.; заявник і патентовласник Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова національної академії наук України. – № a200703615; заявл. 02.04.07; опубл. 10.12.08; Бюл. № 23.

14. Пат. RU 2531842, МПК (2006.01) G01N 25/22. Способ определения теплоты сгорания природного газа и устройство для его осуществления / Карпаш М.О., Рибицкий И.В., Яворский А.В., Юрьев Э.В.; заявники і патентовласники: Карпаш М.О., Рибицкий И.В., Яворский А.В., Юрьев Э.В. – № 2011140504/28; заявл. 05.10.2011; опубл. 10.04.2013; Бюл. № 10.

15. Пат. 48121 U Україна, МПК (2009) G01N25/20. Пристрій для експрес-визначення теплоти згорання природного газу / Карпаш О.М., Дарвай І.Я.; заявник і патентовласник Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – № u200908918; заявл. 27.08.09; опубл. 10.03.10; Бюл. № 5.

16. Пат. 92846 С2 Україна, МПК (2009) G01N25/20. Спосіб експрес-визначення теплоти згорання природного газу / Карпаш О.М., Дарвай І.Я., Карпаш М.О. [та ін.]; заявник і патентовласник Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – № a200905201; заявл. 25.05.09; опубл. 10.12.10; Бюл. № 23.

17. Пат. 112737 С2 Україна, МПК (2006.01) G01N25/20. Спосіб експрес-визначення теплоти згорання природного газу / Середюк О.Є., Лютенко Т.В., Малісевич Н.М. – № a201512215; заявл. 09.12.2015; опубл. 10.10.2016; Бюл. № 19.

Поступила в редакцію 25.05.2018 р.
Рекомендували до друку: докт.техн.наук, проф. Костишин В. С., докт. техн. наук, проф. Семенов Г. Н.