

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РІДКОЇ І ГАЗОПОДІБНОЇ ФАЗ

УДК 620.179

ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЙ ТА РОЗРОБОК ДЛЯ ЕКСПРЕС-КОНТРОЛЮ ТЕПЛОТИ ЗГОРАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

А.В. Яворський, І.Р. Ващишак, І.І. Височанський, М.О. Карнаш

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. 504708, tdm@nung.edu.ua

Розглянуто актуальність контролю якості природного газу та публікації паспортів якості природного газу. Проаналізовано основні показники якості природного газу та їх міри в Україні і закордоном. Встановлено як основний показник призначення теплоту згорання природного газу. Розглянуто прямі та непрямі методи визначення теплоти згорання природного газу. Наведено їх переваги та недоліки. Розглянуто технічні характеристики та проаналізовано особливості застосування технічних засобів, в основу яких покладено відомі методи вимірювання теплоти згорання природного газу. Розглянуто нормативні документи, що регламентують методи вимірювання та методики розрахунку теплоти згорання природного газу. На основі проведеного аналізу запропоновано застосувати метод для експрес-контролю теплоти згорання природного газу, який полягає в комплексному вимірюванні швидкості поширення ультразвуку в газі та вмісту діоксиду вуглецю і подальшому їх обробленні за допомогою застосування штучної нейронної мережі. З метою технічної реалізації даного методу визначення питомої теплоти згорання сформовано ряд вимог до приладу для експрес-контролю теплоти згорання природного газу та розроблено його технологічну схему.

Ключові слова: якість природного газу, теплота згорання, експрес-контроль, кореляція.

Рассмотрены актуальность контроля качества природного газа и публикации паспортов качества природного газа. Проанализированы основные показатели качества природного газа и их меры в Украине и за рубежом. Рассмотрены прямые и косвенные методы определения теплоты сгорания природного газа. Приведены их преимущества и недостатки. Рассмотрены технические характеристики и проанализированы особенности применения технических средств, в основу которых положены известные методы измерения теплоты сгорания природного газа. Рассмотрены нормативные документы, регламентирующие методы измерения и методики расчета теплоты сгорания природного газа. На основе проведенного анализа предложено применить метод для экспресс-контроля теплоты сгорания природного газа, который заключается в комплексном измерении скорости распространения ультразвука в газе и содержания диоксида углерода и дальнейшем их обработке с помощью применения искусственной нейронной сети. С целью технической реализации данного метода определения удельной теплоты сгорания сформирован ряд требований к прибору для экспресс-контроля теплоты сгорания природного газа и разработана его технологическую схему.

Ключевые слова: качество природного газа, теплота сгорания, экспресс-контроль, корреляция.

Feasibility study of heat capacity measurement devices and official data on gas quality published in Ukraine. Key indicators of quality of natural gas have been analyzed and their ranges stated in Ukraine and foreign data comparison provided. Clearly stated that heat capacity is the main quality indicator of natural gas. Direct and indirect methods of heat capacity measurements were considered. Main benefits and drawbacks of those were identified. Main technical features of technical means were collected and compared with relation to measurement of heat capacity. Relevant normative documents stating the methods and procedures of sampling and measurements have been reviewed. Based on the analysis done we have proposed to use correlative method for measurement of heat capacity of natural gas which is about measurement of ultrasound speed and CO₂ content in natural gas with postprocessing with artificial neural network. In order to technically embody the proposed method of heat capacity we have formed the list of requirements to the device and the scheme of it was proposed.

Key words: quality, natural gas, heat capacity, express measurement, correlation.

В умовах глобалізації світового ринку проблема якості продукції, зокрема стратегічної, стає все більш актуальною, оскільки лише високоякісна продукція може бути конкурентоспроможною.

Природний газ, який є високо енергоємною та хімічно цінною сировиною, поза всяким сумнівом, належить до стратегічних видів продукції, що зумовило широке використання його як у побуті, так і в багатьох галузях промисловості. Зокрема, найбільшою сферою використання природного газу є промислове та комунально-побутове господарство, тобто використання його як енергоносія [1].

Енергетична та хімічна цінність газу спричинила велику увагу до нього як до об'єкта дослідження спеціалістів різних профілів. Однак, слід зазначити, якщо таким актуальним питанням як вимірювання витрати природного газу та його обліку посвячено багато робіт, то питання оцінювання якості газу в Україні сьогодні практично мало досліджується, хоч воно є надзвичайно актуальним, оскільки постійне зростання ціни на газ на світовому ринку і розширення сфер його використання зумовлює підвищення вимог до якості природного газу та до методики її визначення [2]. Очевидно, що продовженням цих досліджень буде питання управління якістю природного газу на всьому ланцюжку його постачання – від видобування через транспортування мережами різного тиску до кінцевого споживача.

Очевидно, що ціна природного газу повинна залежати від його якості. Основним показником призначення природного газу є його питома теплота згорання. Оперативне та достовірне визначення цього показника газу дасть змогу прив'язати до його якості ціну, вартість транспортування та зберігання. Необхідно зазначити, що на правовому рівні в Україні регламентовано порядок дій у випадку виявлення неякісного газу, проте в жодному з нормативно-правових документів не встановлено оперативного та достовірного способу контролювання якості природного газу. Крім того, НКРЕКП оголосило про плани щодо переходу комерційних розрахунків за природний газ за нього із 3 кварталу 2017 року.

Крім того, з 2015 року оператор вітчизняної газотранспортної системи розпочав на постійній основі публікацію паспортів якості природного газу, який надходить до регіональних підприємств по газопостачанню для подальшого його транспортування споживачам [3]. Таким чином, громадськість у відкритому доступі отримує можливість ознайомитись з результатами усіх аналізів фізико-хімічних показників за попередній місяць по всій системі магістральних газопроводів ПАТ«Укртрансгаз». Якість природного газу, який транспортувався споживачам за серпень місяць наведено на рис.1. Мінімальний рівень калорійності, встановлений стандартами, складає 7600 ккал/куб.м. [4]. Варто зазначити, що у серпні місяці поточного року для потреб вітчизняних споживачів надходив якісний природний газ з середньою калорійністю від 8204 до 8540 ккал/куб.м. Кодекс газопостачання при цьому встановлює мінімальний рівень калорійності на рівні 7800 ккал/куб.м.

Оприлюднені паспорти включають: компонентний склад та інші фізико-хімічні показники, які характеризують калорійність і якість блакитного палива [3].

Таке інформування здійснюють систематично з періодичністю один раз в місяць. Опубліковані паспорти якості природного газу систематизовані по регіонам України із зазначенням об'єкту відбору проби та його прив'язки до магістрального трубопроводу.

Проте, навіть із рисунку 1 видно, що у абсолютних одиницях різниця між найвищим та найменшим значеннями теплоти згорання між областями складає 336 ккал/м.куб, або майже 4%. Слід згадати, що дослідження у питаннях обліку об'ємної витрати природного газу на сьогодні зосереджені почасти на підвищенні точності в межах 0,1%.

Відповідно до цього актуальною є задача створення вітчизняного засобу вимірювальної техніки для експрес-контролю теплоти згорання природного газу як основного показника його якості.

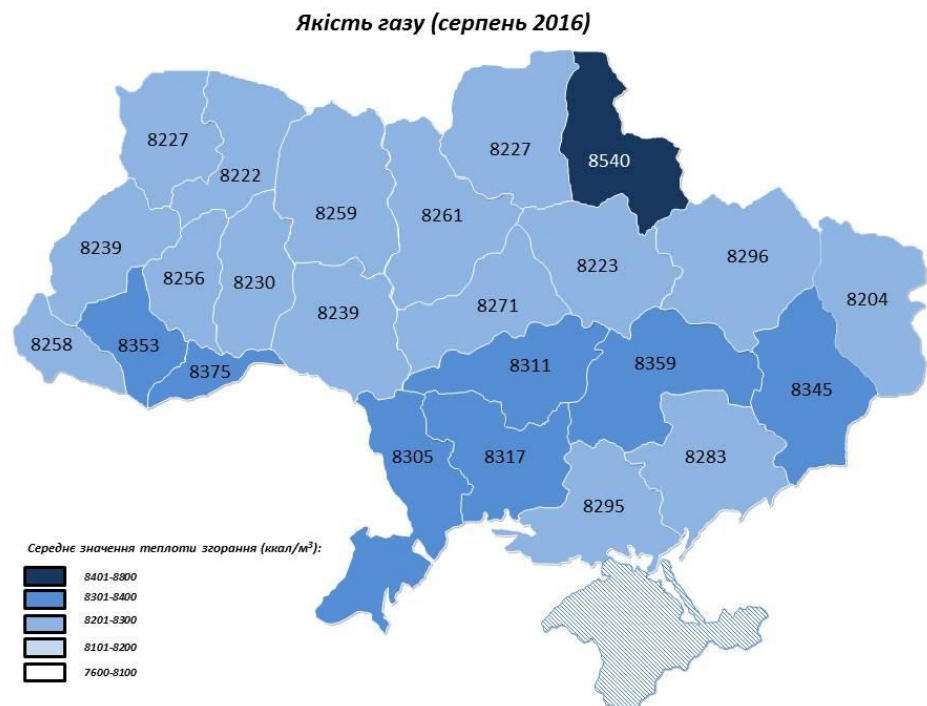


Рисунок 1 – Якість природного газу, який транспортувався споживачам за серпень 2016 року

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій.

Згідно з ДСТУ 2925-94 “Якість продукції. Оцінювання якості. Терміни та визначення” якість продукції – це сукупність характеристик продукції, які стосуються її здатності задовольняти встановлені і передбачені потреби [5]. Стосовно природного газу ці потреби загалом мають дуже широкий спектр: щодо використання газу як сировини в паливно-енергетичній промисловості – одні, в хімічній промисловості – інші, стосовно транспортування чи обліку газу – ще інші тощо.

Щоб отримати необхідну інформацію про газ, споживач звертається до відповідних стандартів та інших нормативно-технічних документів, які чинні в Україні і регламентують його характеристики. Однак, основною енергетичною характеристикою природного газу є теплота згорання, тобто кількість теплоти, виділена під час повного згорання одиниці об’єму сухого газу, виміряного за стандартних умов.

Теплоту згорання можна назвати основним показником якості природного газу, оскільки теплота згорання є показником призначення [6-7], який визначає енергетичну цінність газу. Тим більше, що надходження та вибуття обсягів газу, який пройшов через кордон України (за умовами договору) здійснюється з врахуванням

його калорійності [8].

На сьогоднішній день вимоги до горючого природного газу, який призначений для промислового та комунально-побутового споживання, викладені в ГОСТ 5542 [9], який успадкований від колишнього Радянського Союзу.

У разі зниження якісних показників газу українські споживачі мають право на зменшення розміру плати [10]. В разі відхилення параметрів якості газу від встановленої величини в нормативних документах газопостачальна (газотранспортна) організація повинна здійснювати перерахунок розміру плати за газопостачання за період з дня подання заявки споживачем до дати, коли газопостачальна (газотранспортна) організація відновила параметри газу. Плата за спожитий газ зменшується пропорційно зменшенню кожного з параметрів якості природного газу, встановлених у [11] з дня встановлення факту таких змін до дня їх відновлення. Проте, більшість споживачів не мають можливості здійснювати моніторинг якості природного газу.

На даний час найуживанішою одиничною мірою у світі, яка характеризує процес горіння газу, є число Воббе – це показник якості газу, що використовується в побутових газових

пальниках. Він визначає режим горіння газу в побутових приладах, взаємозаміну газу змінного складу для забезпечення нормального режиму горіння. Число Воббе враховує взаємозв'язок теплоти згоряння газу і густини газу у відношенні до повітря [12].

В Україні відповідно до вимог ГОСТ 5542 [9] нормується значення числа Воббе вищого (тобто з врахуванням вищої теплоти згоряння), номінальне значення якого встановлюють в межах норми показника. Аналіз нормативних документів Європейського Союзу, що регламентують якісні (фізико-хімічні) показники природного газу [13], показує як українські вимоги відрізняються від вимог європейських держав.

На відміну від України, у Європі регламентується діапазон вищої теплоти згоряння (тобто повна теплота, яка виділяється під час згоряння природного газу). Також європейські стандарти вимагають дотримання встановлених меж таких показників як вміст діоксиду вуглецю, індекс неповного згоряння, вміст азоту, індекс попелотворення, вміст інертних газів тощо. Межі зміни числа Воббе в Україні значно ширші, ніж у європейських нормативах. Середня різниця між мінімальним та максимальним значеннями числа Воббе у Європі складає $4,38 \text{ МДж/м}^3$, а в нашій державі вона складає $13,3 \text{ МДж/м}^3$ [9]. Падіння числа Воббе призводить до зниження тепла, що виділяється при згорянні природного газу, тому точні пристрої (наприклад, миттєві нагрівачі води) не можуть працювати належним чином, може відбутися загасання полум'я і, як наслідок, вибух. Збільшення ж числа Воббе призводить до того призводить до неповного згоряння. Особливо слід відзначити, що в Україні не нормується вміст у газі діоксиду вуглецю та азоту, які є однією з причин недостатнього згоряння. У сухому газі CO_2 та азот утворюють баластну суміш, яка знижує калорійність газу. Відсутність у наших нормативних вимогах таких показників як індекс попелотворення та індекс неповного згоряння не дозволяють отримати повну інформацію про показники згоряння газу.

Такий стан речей створює передумови для постачальників природного газу щодо зниження його якості за рахунок погіршення ряду фізико-хімічних показників в процесі технологічної підготовки (підвищена вологість газу, збільшення неуглеводневих компонентів тощо).

Важливість теплоти згоряння газу, як його визначальної енергетичної характеристики, підтверджується тим, що в більшості країн світу

для здійснення розрахунків між споживачем та постачальником газу використовують такий його показник, як енергія E , який визначають як добуток об'єму газу Q , м^3 на його теплоту згоряння H_H [14-17]:

$$E = Q \cdot H_H \quad (1)$$

Ціна на газ згідно з ISO 15112 [14] формується не лише з урахуванням витрати природного газу, а й з урахуванням його теплоти згоряння. Характеристика, яка враховує ці два показники називається енерговитратою e та вимірюється у МДж/с .

Отже, результати аналізування вітчизняних та закордонних НД у сфері якості природного газу показали, що для оцінювання енергетичної цінності природного газу за визначальний (головний) показник якості доцільно прийняти його нижчу теплоту згоряння.

Для визначення теплоти згоряння природного газу використовують прямі та непрямі методи. До прямих відносять калориметричні методи, до непрямих – розрахунковий метод, який базується на визначенні теплоти згоряння із компонентного складу газової суміші, а також кореляційні методи, в основу яких покладена кореляційна залежність між фізичними властивостями природного газу та його теплою згоряння [14].

Калориметричні методи визначення теплоти згоряння природного газу

Суть калориметричних методів базується на вимірюванні кількості теплоти, яка виділяється при повному згорянні газу. Вони поділяються на:

– метод дискретного спалювання газу у калориметричній бомбі у середовищі стисненого кисню визначеного об'єму газу, який залежить від місткості даної бомби, атмосферного тиску, температури і залишкового тиску газу у бомбі, та визначенні кількості тепла, яке виділяється при згорянні, а також при утворенні і розчиненні у воді азотної і сірчаної кислот, що виникають при дослідженні [15];

– метод неперервного спалювання газу в проточному газовому калориметрі за постійного тиску. Суть методу полягає у неперервному спалюванні у калориметрі вимірюваного об'єму газу і вимірюванні тепла, яке виділиться при цьому та яке поглинається неперервно протікаючим потоком води [16];

– метод дискретного спалювання газу у газовому пальнику калориметра за постійного тиску [17].

З точки зору вимог сучасного виробництва калориметричні методи мають ряд суттєвих

недоліків.

Одним з основних недоліків калориметричного методу є необхідність безпосереднього спалювання проби природного газу. Для визначення теплоти згоряння палива калориметричним методом необхідні значні часові витрати, оскільки потрібно спалити достатньо велику кількість газу, а також необхідно для отримання конкретного значення теплоти згоряння палива математично обробити розрізнені дані, отримані в результаті спалювання палива.

Для більшої точності визначення теплоти згоряння калориметричним методом необхідно, щоб кількості тепла, що вносяться газом і повітрям у калориметр, дорівнювали кількості тепла, що виноситься з калориметра з продуктами згорання.

Таким чином, з точки зору технологічних та економічних вимог сучасного виробництва калориметричний метод має достатню точність, однак з огляду на істотний вплив наведених вище факторів на отримувані результати, а також в силу того, що цей метод вимагає значних часових витрат, він не є універсальним.

Додатковими обмеженнями цього методу є складність автоматизації вимірювань, а також неможливість потокового режиму вимірювань.

Засоби виміральної техніки, в основу яких покладено калориметричний метод визначення теплоти згоряння природного газу

Розробкою фірми *UNION Apparatebau GmbH* (Німеччина) є газовий калориметр CWD2000, призначений для визначення об'ємної теплоти згоряння горючих газів, у тому числі природного [18]. Калориметр CWD2000 є приладом неперервної дії, робота якого заснована на використанні залежності об'ємної теплоти згорання газу від його густини та числа Воббе (теплого еквіваленту). Після спалювання відпрацьований газ змішується з потоком охолоджувального повітря, а температура цієї суміші вимірюється термобатаресю, що складається з термопар, вільні кінці яких знаходяться в потоці охолоджувального повітря. ТермоЕРС, що при цьому виникає, буде пропорційна різниці температур і числу Воббе спалюваного газу. Густина газу визначається в спеціальній комірці. У мікропроцесорі за відомими залежностями, з урахуванням поправок на втрати тепла, визначається об'ємна теплота згорання газу.

Калориметр конструктивно виконаний у виді навісної шафи (рис.2). В калориметрі використовуються різноманітні фільтри для попереднього очищення досліджуваних газів.

До недоліків калориметра CWD2000 слід віднести: значну витрату газу на спалювання (15...200 л/год. в залежності від властивостей газу), неможливість роботи приладу в польових умовах через значні габарити (1016×762×330 мм) та вагу (50,5 кг), обмежений діапазон робочих температур (мінус 5...плюс 40°C) і вибухонебезпеку.



Рисунок 2 – Калориметр CWD2000

Багатопараметровий термогазоаналізатор серії *SG12WMTA* (BAGGI, Італія) (рис. 3) вимірює безпосередньо в реальному часі найважливіші енергетичні характеристики газу: число Воббе, калорійність, питома вага та індекс витрати повітря для горіння [19].



Рисунок 3 – Багатопараметровий термогазоаналізатор серії SG12WMTA

Принцип дії багатопараметрового термогазоаналізатора полягає в наступному: спалюється порція газу і вимірюється кількість теплоти, яка передана охолоджуючому газу (визначається теплотворна здатність газу). Для визначення числа Воббе вимірюється значення питомої ваги газу (високоточний сенсор сили тяжіння вбудований в аналізатор). Далі мікропроцесор обчислює теплотворну здатність і витрату повітря для горіння. Прилад застосовується для контролю природного газу, коксового газу, газових сумішей.

Діапазон вимірювання: число

Воббе/калорійність (мін.) 3000 ... 6000 кДж/м³; 720 ... 1435 Ккал/м³; число Воббе/калорійність (макс) 60000 ... 130000 кДж/м³; 14350 ... 31050 Ккал/м³. Тиск на вході системи >= 40 до 60 кПа. Робоча температура від +40 до +110 °С. Час реакції: 20 – 90 с в 90%, 45 – 115 с в 99%. Живлення – 220 В.

Переваги SG12WMTA: висока швидкість; вимірювання числа Воббе безпосередньо з високою точністю; вимірювання не залежить від складу газу і можливе також з брудним і нестабільним газом; низька потреба в технічному обслуговуванні; надійна міцність; простота в обслуговуванні.

Виготовляється з різним дизайном SG12WMTA-Series та може бути налаштований, щоб задовольнити конкретну потребу економії витрат при монтажі та технічному обслуговуванні на місці.

Калориметр WIM9900 (Hobré, США) вимірює індекс Воббе, витрату повітря, теплотворну здатність на основі вимірювання залишкового кисню (кількість тепла, що виділяється за повного згорання одиниці певного обсягу газу з повітрям) (рис.4) [20].

Принцип вимірювання аналізатора заснований на вимірюванні залишкового кисню після каталітичного спалювання факельного, або паливного газу. Невеликий потік проби безперервно змішується з сухим повітрям в постійному фіксованому співвідношенні. Це співвідношення залежить від складу газу і визначається на індивідуальній основі. За допомогою електричного нагрітого каталізатора горюча суміш повітря повністю обпалюється за температури приблизно 800°C. Залишковий кисень вимірюють за допомогою високоточної і надійної клітини оксиду цирконію. Цей залишковий вміст кисню добре корелює з індексом Воббе. Для того, щоб отримати калорійність / теплотворну здатність застосовують безперервне вимірювання, засноване на принципі віброуючої котушки (точність: +/- 0,1%).

Діапазон вимірювання числа Воббе: 0-100 МДж/м³; теплотворна здатність: 0-120МДж/м³; індекс витрати повітря: 0 -25. Точність вимірювання +/- 0,4% для природного газу, +/- 1% для паливного газу. Час відгуку – 5 с. Температура навколишнього середовища -40 + 10 °С.

Переваги аналізатора: швидке реагування, висока точність і низький рівень шуму, великий ефективний діапазон виміру 0-100 МДж/м³; мінімальне технічне обслуговування, підходить для агресивних газів і з домішками сірки.



Рисунок 4 – Калориметр WIM9900

Загальним недоліком для усіх наведених засобів вимірювальної техніки є те, що вони мають значні масогабаритні показники і спалюють пробу газу, що значно обмежує область застосування таких ЗВТ.

Розрахунковий метод визначення теплоти згорання природного газу

Розрахунковий метод заснований на визначенні компонентного складу хроматографічним методом [21] та використання табличних значень теплоти згорання чистих компонентів газової суміші згідно з [12].

Основою методу визначення розрахункової теплоти згорання природного газу є уявлення про цю величину як про суму теплоти згорання елементів, які містяться у паливі, або їх сполук. Отже, для такого роду підрахунку мають бути відомі кількості різноманітних сполук в паливі (його хімічний склад) і теплота їх згорання.

Теплоту згорання природного газу об'ємну (вищу, або нижчу) розраховують за компонентним складом і теплою згорання окремих компонентів газу за допомогою газових хроматографів [22-25]. Компонентний склад газу в об'ємних частках процента визначають хроматографічним методом за ГОСТ 23781 [21] методом абсолютного калібрування. Визначають всі компоненти, об'ємна частка яких перевищує 0,005%, крім метану, вміст якого визначають за різницею 100% і суми всіх компонентів.

Відповідно до вимог ГОСТ 23781 [21] існує два методи хроматографічного кількісного

визначення компонентів:

1) метод А – метод визначення азоту, кисню, гелію, водню, діоксиду вуглецю та вуглеводнів C1 – C6 при об'ємній частці вуглеводнів C5 і вищих не більше від 1% та азоту не більше від 20%;

2) метод Б – метод визначення вуглеводнів від C4 і вищих (до C8) при об'ємній частці від 0,001% до 0,5 %.

Суттєвими недоліками розрахункового (хроматографічного) методу є:

- непрямий характер вимірювань теплоти згоряння природного газу;
- неврахування вмісту неуглеводневих компонентів при визначенні теплоти згоряння природного газу;
- висока вартість технічних засобів (хроматографів) та витратних матеріалів (гази носії);
- неможливість виконання вимірювань у технологічних умовах;
- значний час, який необхідний для проведення контролю.

Хоч гази відносяться до речовин з індивідуальним хімічним характером, хімічним аналізом точно встановлюється кількість і тип сполук, з яких вони складаються, що повинно давати точний результат при визначенні теплоти згоряння природного газу розрахунковим шляхом, однак на практиці виникають похибки, які визначаються наявністю в складі газу неграничних вуглеводів. Для ненасичених вуглеводнів приймають, зазвичай, деяке усереднене значення теплоти згоряння, в той час як ці значення для різних ненасичених вуглеводнів мають велику відмінність. Одним із факторів, що впливає на точність у визначенні теплоти згоряння природного газу розрахунковим шляхом, є наявність у складі газу водяних парів. Оскільки у розрахунковій формулі облік відсоткового складу вмісту води відсутній, то їх вплив не враховується, однак практично вміст водяних парів істотно впливає на значення теплоти згоряння газу безпосередньо при його спалюванні.

Тому слід зазначити, що розрахунковий метод визначення теплотворності газу має недоліки, такі як значні часові витрати, необхідні для отримання остаточного значення теплоти згоряння природного газу та низька точність отриманих результатів.

Розробкою фірми *ELSTER INSTROMET* (Німеччина) є промисловий газовий хроматограф *EnCal 3000* призначений для вимірювання енергії газу [22]. Він поєднує в собі систему забору проби, аналітичну частину та контролер у одному вибухозахисному блоці

(рис. 5). Прилад може визначати густину, теплотворну здатність газу та його енергію при проходженні через замірний вузол. У приладі використовується мікродетектор теплоти згоряння виконаний з використанням технології *MEMS* (Micro Electro-Mechanical System), яка є електромеханічною системою у масштабі чіпів. Це дозволило суттєво зменшити габарити приладу та підвищити його надійність. Обмін даними здійснюється завдяки двом вільно конфігурованим комунікаційним протоколам *Modbus* через інтерфейс *TCP/IP*.

До основного недоліку хроматографа *EnCal 3000* слід віднести необхідність роботи у закритому приміщенні з температурою, вищою за 0 °C та відповідною вологістю, що унеможлиблює його використання в польових умовах безпосередньо на газопроводах у будь-якому пору доби і року. Також недоліком є необхідність у використанні газів-носіїв.



Рисунок 5 – Хроматограф „EnCal 3000”

Російська компанія „Русгазтех” використовує вимірювальний комплекс технічних і програмних засобів „Флоухром”, який має можливість визначати за компонентним складом густину, індекс Воббе, коефіцієнт стискуваності, теплотворну здатність газу (згідно з ISO 6976) та його енергію [23]. До складу системи (рис. 6) входять вимірювальний комплекс на базі обчислювача витрати газу *Flowtec* та хроматографічний модуль *FLONIDAN HGC 303*, який успішно використовується у Королівстві Данія. Даний модуль призначений для використання в інтеграції із „Флоу-комп'ютерами” для безперервного визначення енергії та густини природного газу. Програмне забезпечення приладу дає змогу синхронізувати як передачу параметрів на „Флоу-комп'ютер”, так і вести окреме протоколювання задач та вимірювань у виді самостійної бази даних. Прилад має як опцію функцію автокалібрування [23].

Недоліками вимірювального комплексу є його значні розміри (габаритні розміри

хроматографічного модуля, мм - 420×400×320; габаритні розміри обчислювача, мм - 600×600×400) та модульна конструкція (хроматографічний модуль – на газопроводі, обчислювач – у приміщенні), що обмежує застосування комплексу для експрес-контролю, а також значний час на проведення вимірювань.



а)



б)

Рисунок 6 – Хроматографічний модуль FLONIDAN HGC 303 а) та обчислювача витрати газу Flowtec б)

Промислово – комерційна група “Транат” (Росія) виготовляє значну кількість хроматографів для визначення характеристик природного газу. Серед них: малогабаритний газовий хроматограф для визначення складу природного газу “АХТ-ПГ”, промисловий газовий хроматограф “МАГ”, промисловий потоковий газовий хроматограф “ПЕТРОХРОМ-4000”.

Малогабаритний хроматограф “АХТ-ПГ” призначений для кількісного визначення компонентного складу природного газу (відповідно до ГОСТ 23781), визначення його вищої і нижчої теплоти згорання, відносної та абсолютної густини, числа Воббе (відповідно до ГОСТ 22667) [24]. Невеликі габарити (рис. 7), можливість роботи від акумулятора автомобіля та від мережі дозволяють використовувати його як в стаціонарних умовах, так і у пересувній лабораторії. “АХТ-ПГ” працює в режимі програмування температури і витрати газу – носія.

До недоліків хроматографа “АХТ-ПГ слід віднести значний час для виходу на робочий режим (до 60 хв.) та необхідність у

використання газу-носія з високим ступенем очищення.



Рисунок 7 – Хроматограф “АХТ-ПГ”

Промисловий газовий хроматограф “МАГ” призначений для поточкових вимірювань компонентного складу природного газу за ГОСТ 31371, Частина 7 і обчислення за компонентним складом значень величин теплоти згорання, відносної і абсолютної густини, коефіцієнта стисливості і числа Воббе (відповідно до ГОСТ 31369) [25]. Застосування в хроматографі аналітичних модулів створених на базі MEMS технологій, що містять мікродетектор, мікроінжектор і капілярні колонки дозволило забезпечити малі габарити приладу (рис. 8), високу швидкість аналізу в поєднанні з високою точністю вимірювань, низьке споживання електроенергії і газу-носія. У хроматографі реалізовано зворотне продування, що дозволяє отримати сумарний пік гексану і важчих вуглеводнів в строгій відповідності з ГОСТ 31371.7.



Рисунок 8 – Хроматограф “МАГ”

Недоліками хроматографа “МАГ” є значні маса (40 кг) і потужність споживання, а також необхідність у газі-носії високого ступеня очищення (гелій газоподібний, не гірше марки «А»).

Промисловий потоковий газовий хроматограф “ПЕТРОХРОМ-4000” призначений для аналізу складу і контролю якості природного газу [26]. Його виконано повністю вибухозахищеним (рис. 9). Визначення складу природного газу здійснюється згідно з вимогами ГОСТ 31371 (ISO 6974) з розрахунком теплоти згорання, числа Воббе, відносної і абсолютної густини, тиску насиченої пари згідно з ГОСТ

31369 (ISO 6976). Вбудована система діагностики дозволяє виявляти можливі несправності хроматографа і помилки розрахунків.

До недоліків хроматографа “ПЕТРОХРОМ-4000 слід віднести, вузький діапазон робочих температур (0...+40 °C) та значний час виходу на робочий режим (біля 2 год.), що ускладнює його застосування для проведення експрес-контролю характеристик природного газу.



Рисунок 9 – Хроматограф ПЕТРОХРОМ-4000

Сучасною розробкою концерну *SIEMENS AG* є промисловий газовий мікрохроматограф *Micro SAM* виконаний у вигляді диска (36×22 см) [27]. Розрахований на аналіз тільки одного потоку і може бути запрограмований на базі *Windows* і *Ethernet*-комунікацій та під'єднаний до „флоу-комп'ютера” для визначення енергії газових потоків. Для мультидетекції використовується матриця теплопровідних детекторів. У цьому польовому приладі вперше застосовані принципи „In-line” детектування. Матриця детектора теплопровідності здійснює заміри на всіх виходах колонок і на виході зворотного продування, а також додатковий контроль дозування безпосередньо після пристрою введення проби. Використання принципів паралельної хроматографії у поєднанні з мульти-детектуванням дало змогу підвищити достовірність результатів вимірювань і знизити час аналізу для забезпечення контролю складу проб в режимі реального часу.

Недоліком мікрохроматографа *Micro SAM* є значний час на проведення аналізу (600 с) та необхідність у газі-носії високого ступеня очищення (гелій $\leq 5 \text{ пм}^3/\text{с}$).



Рисунок 10 – Мікрохроматограф Micro SAM

Аналізатор природного газу *AMETEK* модель 292B (США) представляє собою легкий, міцний портативний хроматограф, що використовується для аналізу складу та визначення теплотворної здатності зразка трубопровідного газу на місці [28]. Модель 292B призначена для роботи в якості автономного пристрою, здатного вимірювати зразки газу безпосередньо в польових умовах, і підходить для установки в мобільній платформі, такий як вантажівка, фургон або автомобіль (рис. 11).



Рисунок 11 – Аналізатор природного газу АМЕТЕК модель 292В

Функції аналізатора включають в себе внутрішні системи відбору проб і газорозподільні компоненти, які дозволяють пряме підключення до пробозабірною газопроводу. Кількість кожного компонента точно визначають за допомогою чутливого детектора теплопровідності. Результати аналізу відображаються з використанням кольору на світлодіодному дисплеї і зберігаються в пам'яті. Площа під кожним з піків пропорційна концентрації компонента, присутнього в зразку. Внутрішня пам'ять хроматографа зберігає попередні результати, а також дані калібрування.

Для відбору проб необхідно ввести зонд в потік газу приблизно в центрі газопроводу при зниженому тиску. Для цього система *AMETEK* включає в себе клапан, який регулює потік проби, обвідний контур і вентилування.

Модель 292B хроматографа здатна вимірювати наступні компоненти: вуглеводні (C1 - C5, C6 +), азот (N₂), двоокис вуглецю (CO₂). Розрахунки теплотворної здатності виконуються відповідно до стандартів ISO за допомогою спеціалізованого інтерфейсу приладу. Точність результату залежить від точності сертифікованої суміші газів, що використовується для калібрування. Для комерційного обліку газу калібрування здійснюють через кожні 24 години, для інших цілей, в більшості випадків, достатньо повторне калібрування проводити кожні 30 днів.

Перевагами хроматографа АМЕТЕК є поліпшена відтворюваність і точність, а також можливість вимірювання складу газу безпосередньо поблизу установок газопроводів. В моделі 292B впроваджена система кондиціонування зразка. Аналізатор АМЕТЕК 292B простий у використанні, надійний, виключає необхідність тривалої підготовки оператора.

Кореляційні методи визначення теплоти згоряння природного газу

В галузі вимірювання властивостей газу помітні безпрецедентні зміни протягом останніх років. Сучасні розробки, в основному, зазнають впливу кореляційних методів, що дозволяють розраховувати такі властивості природного газу, як теплота згоряння, число Воббе та нормальна густина шляхом вимірювання різних фізичних параметрів. Розробки в цій галузі характеризуються порівняно невисокою вартістю, а частина з них вже доступна у вигляді серійних пристроїв. У певних випадках їх доцільно використовувати для розрахунків за спожиту енергію, оскільки цей сегмент ринку засобів контролю був охоплений калориметричними та хроматографічними технічними засобами, особливості яких описано вище.

Крім того, розвиток різноманітних засобів вимірювальної техніки дозволив розробити ряд методів контролю теплоти згоряння природного газу на основі використання характеристик взаємодії різних фізичних полів та середовищ із певними компонентами природного газу [30-31].

При лібералізації ринку газу в країнах Європейського союзу, як очікується, властивості газу будуть змінюватися частіше і сильніше. У результаті цього, попит на системи для визначення властивостей природного газу, таких як теплота згоряння природного газу, число Воббе, нормальна густина або метанове число, ймовірно, зростатиме. Точні відомості про властивості газу мають велике економічне і технічне значення у переважній більшості

секторів економіки.

При складанні розрахунків за спожиту енергію, вимірювання теплоти згоряння природного газу, що поставляється, повинно бути здійснено дуже точно. Інші властивості газу, такі як нормальна густина газу та вміст діоксиду вуглецю у ньому повинні визначити чинник правових відхилень відповідно до ISO 12213.3 [32], необхідних для перетворення об'єму за робочих умов до об'єму за нормальних умов.

Технологічні газові хроматографи уже досягли стадії, коли невизначеність вимірювання та імовірність відмов є дуже низькими. Тим не менше, капітальні та експлуатаційні витрати для їх обслуговування і досі залишаються значними. Тому впродовж останніх кількох років були зроблені значні наукові і технічні зусилля з метою розроблення альтернативних методів вимірювання, які б характеризувались нижчою вартістю. Ці нові методи вимірювань зазвичай відносять до кореляційних. Деякі методи є дуже точними і можуть конкурувати з калориметричними та хроматографічними. Інші розробки приділяли більше уваги низькій вартості за рахунок певного зниження точності.

Кореляційні методи вимірювання базуються на різноманітних фізичних властивостях (у тому числі, на швидкості звуку, теплопровідності, інфрачервоному поглинанні, діелектричній проникності тощо). В більшості випадків, вимірюється три фізико-хімічні параметри природного газу. За вимірювальними сигналами, що надходять, визначаються необхідні дані про властивості газу, наприклад, теплоту згоряння природного газу або нормальну густину. Метод є новим, оскільки якість газу можна охарактеризувати тільки за трьома вимірними параметрами, а аналіз природного газу з метою визначення теплоти згоряння природного газу, зазвичай, включає принаймні від 8 до 10 компонентів (як для випадку газової хроматографії).

До кореляційних методів визначення теплоти згоряння природного газу відносять:

- ϵ -метод. Цей метод був розроблений в рамках співпраці проекту NV *Nederlandse Gasunie* (Нідерланди) та *Ruhrigas AG* (Німеччина) з метою забезпечення високоточного вимірювання системи для формування розрахунків за спожиту енергію [33]. Суть даного методу полягає у встановленні кореляційних зв'язків між вимірюваною діелектричною проникністю та теплотою згоряння природного газу. Метод передбачає високі вимоги до електроніки аналізатора, а

також важко досяжні виробничі допуски та властивості матеріалів, щодо вимірювальної комірки (наприклад, позолочені поверхні).

Точність приладів, що реалізують даний метод перебуває на рівні $\Delta H_V < \pm 0,2\%$ і була доведена на лабораторному прототипі. Тим не менше, подальший розвиток на шляху до серійного виробництва виявився складним через високу вартість виробництва, яку пов'язують із резонансним методом для вимірювання діелектричної проникності, розробленим Національною інженерною лабораторією (Нідерланди).

- метод інфрачервоної спектрометрії. Цей метод, розроблений *FlowComp Systemtechnik*, реалізований за допомогою скануючого інфрачервоного (ІЧ) спектрометра з високою роздільною здатністю. Спектр газів має вигляд розподілу молекулярних сполук основних газових складових. Кожна молекулярна сполука відповідає певній кількості енергії та маси, що формує теплоту згоряння природного газу та його густину. За допомогою додаткових вимірювань стану (температура, тиск) можливо описати вплив азоту і, таким чином, визначити якість газу. Результати лабораторних досліджень свідчать про високу лінійність для широкого спектру газів.

Хоча його принцип вимірювання є фізично обґрунтованим і початкові вимірювання дають дуже обнадійливі результати, цей метод не зазнав подальшого розвитку. Разом з *Ruhrgas AG*, *FlowComp* виконує роботи щодо доведення розробленої системи до стадії серійного виробництва [34].

- метод *EMC 500*. Суть методу, що реалізується системою *EMC 500*, розробленою *RMG*, полягає у вимірюванні теплоємності, теплопровідності та в'язкості газу за допомогою різних систем сенсорів. Система *EMC 500* є моделлю, що продовжує систему *WOM 2000* на ринку вимірювальних засобів (рис. 12) [35]. За бажання, вміст CO_2 може бути виміряний за допомогою інфрачервоного сенсора. Метод забезпечує визначення всіх необхідних властивостей, які дають змогу розрахувати фактор правового відхилення, а тому можуть бути використані для розрахунків за спожитої енергії. В Німеччині було подано заявку на офіційне затвердження цієї розробки на рівні законодавства в галузі метрології. У зв'язку з цим затвердженням *Ruhrgas AG* виконано польові випробування *EMC 500*. Система *EMC 500* дозволяє також вимірювати число Воббе.



Рисунок 12 – Система EMC 500

- метод *GasPT*. Метод базується на вимірюванні швидкості звуку та теплопровідності за двох значень температури. Хоча теплопровідність вимірюється за допомогою стандартних сенсорів, швидкість звуку вимірювалася за допомогою спеціально розробленого резонатора. Найбільш досконалим вимірювальним приладом є засіб, розроблений фірмою *Advantica* [36]. Пристрої доступні на ринку з 2001 року і, в основному, призначені для контролю числа Воббе. Вимірювання енергії в домашніх господарствах, може бути також можливе за умови того, що прилад працюватиме в поєднанні з ультразвуковим лічильником газу [37].

- вимірювальна система *GasQS*, розроблена *MEMS AG* (Швейцарія) [38] базується на використанні трьох фізичних параметрів – теплопровідність, теплоємність та швидкість потоку газу. Для вимірювання швидкості потоку газу використовують давач зі спеціальним соплом. У міру того як значення теплотворної здатності і параметри давача можуть бути аналогічними фізичними законами, можна припустити, що після того, як параметри давача попередньо оброблені для вихідного сигналу, можна знайти кореляцію з теплотворною здатністю.

Для калібрування давачів використовують еталонний газ.

Якщо вимірювання даних величин не дає можливість визначити характеристики газу, вносяться додаткові параметри, щоб досягти максимальної кореляції між теплотворною

здатністю та вихідними величинами. Це приводить до збільшення похибки, оскільки окрім похибки самої кореляції додаються ще похибки вимірювання вхідних параметрів.

Перевагою даної розробки є швидкість проведення вимірювання, надійність і низькі експлуатаційні витрати. Проте це спричинює досить низьку точність вимірювання.

Загалом, аналіз наведених вище кореляційних методів контролю енергетичних показників природного газу вказує на те, що вони мають ряд суттєвих недоліків:

- жодний метод досі не реалізований у вигляді серійних технічних засобів;

- вартість реалізації більшості методів є надзвичайно високою;

- методи не мають серйозного теоретичного обґрунтування, не придатні до використання в технологічних умовах.

Метод експрес-контролю теплоти згоряння природного газу

Методи визначення теплоти згоряння природного газу характеризуються тим, що їх реалізація можлива у лабораторних умовах, а підготовка та вартість проведення досліджень пов'язана із значними фінансовими та часовими витратами. Типовий час дослідження однієї проби відомими пристроями, що реалізують попередні методи, складає 20-30 хвилин. Характерний недолік реалізації калориметричного методу пов'язаний із безпосереднім спалюванням природного газу, а хроматографічний метод за своєю суттю є непрямим методом і не враховує вплив неуглеводневих складових газу (азоту, діоксиду вуглецю тощо).

Описаний в [39-41] метод експрес-контролю теплоти згоряння природного газу має ряд переваг над вищевказаними, головними серед яких є відсутність у потребі спалювання газу, швидкість виконання досліджень, можливість використання у польових умовах, достатня точність.

Теплота згоряння природного газу визначається позитивним впливом вуглеводневих компонентів, що при спалюванні виділяють тепло (метан, етан, пропан, бутани, пентани, гексани, гептани та октани) та негативним впливом компонентів, що не виділяють тепла, або заважають спалюванню вуглеводневих (азот, діоксид вуглецю, кисень, меркаптани, інертні гази тощо).

Кореляційний аналіз основних фізико-хімічних параметрів природного газу, які регламентуються нормативними документами, показав, що високі значення коефіцієнтів кореляції можна спостерігати між теплоото

згоряння природного газу та деякими вуглеводнями (етан, пропан, і-бутан, н-бутан, і-пентан, н-пентан). Ця залежність є логічною, оскільки вуглеводні виділяють основну частину тепла при спалюванні природного газу. А от подальше спадання коефіцієнтів кореляції з теплоото згоряння на н-гексані, н-гептані та н-октані можна пояснити мізерним вмістом цих компонентів у природному газі.

Швидкість звуку в газі корелює з теплоото згоряння. Причому, швидкість звуку досить сильно корелює і з густиною газу, і з молекулярною масою, що можна пояснити фізичним зв'язком між цими параметрами. Схожість картин з коефіцієнтами кореляції для теплоти згоряння та швидкості поширення звуку в газі підтверджує і коефіцієнт кореляції „теплота згоряння – швидкість поширення звуку”. Це значення вказує на наявність нелінійного обернено пропорційного зв'язку між параметрами.

Проведений кореляційний аналіз в [39] показав, що швидкість поширення звуку в природному газі корелює з параметрами, які характеризують хімічний склад (коефіцієнти кореляції мають досить високі значення – понад 0,9), проте швидкість поширення значно менше пов'язана з вмістом азоту та діоксиду вуглецю. Отже, для контролювання теплоти згоряння природного газу достатньо визначати лише швидкість поширення звуку в газі, а також вміст азоту та діоксиду вуглецю.

Комплексне застосування обраних параметрів в [39] реалізовано за допомогою застосування штучної нейронної мережі (ШНМ). Вихідним параметром для ШНМ є теплота згоряння природного газу, а на вхід ШНМ подається комплекс обраних інформативних параметрів (швидкість поширення звуку в газі, вміст азоту та діоксиду вуглецю).

Значення теплоти згоряння природного газу, яку отримано в результаті моделювання роботи ШНМ, відповідає фактичним значенням теплоти згоряння газу, які отримані за хроматографічним методом. Приведена до діапазону похибка визначення теплоти згоряння за допомогою довідкових даних склала 0,11 %.

Даний метод має як теоретичне, так і практичне підтвердження шляхом дослідження на реальних значеннях параметрів природного газу зі сертифікатів якості на природний газ, які визначено на одному з підприємств Івано-Франківської області. Коефіцієнт кореляції між фактичним значенням теплоти згоряння та отриманими за допомогою мережі склав 0,9916, а зведена до діапазону похибка дорівнювала 1,5

% [39].

Результати проведеного дослідження щодо можливості визначення теплоти згоряння природного газу без врахування вмісту азоту дали підстави стверджувати, що значення теплоти згоряння можна отримати шляхом вимірювання швидкості поширення ультразвуку в газі та вмісту діоксиду вуглецю без суттєвого падіння точності порівняно з раніше запропонованим методом.

Отже, даний метод має ряд суттєвих переваг: дозволяє визначати теплоту згоряння природного газу без спалювання проб газу, виключає необхідність визначення повного компонентного складу природного газу, є швидкий та оперативний, володіє достатньою точністю та дозволяє контролювати теплоту згоряння природного газу безперервно.

Аналіз відомих методів та засобів контролю теплоти згоряння природного газу показав, що існує загалом три методи визначення теплоти згоряння: розрахунковий (за компонентним складом), калориметричний та кореляційний. Наведені методи мають ряд суттєвих недоліків, серед яких:

- значні часові та фінансові витрати на проведення досліджень;
- неможливість контролювання якості природного газу безперервно (в режимі реального часу) безпосередньо у споживача;
- відсутність на українському ринку технічних засобів для вимірювання інформативних параметрів, що дозволили б визначати теплоту згоряння за допомогою кореляційних методів.

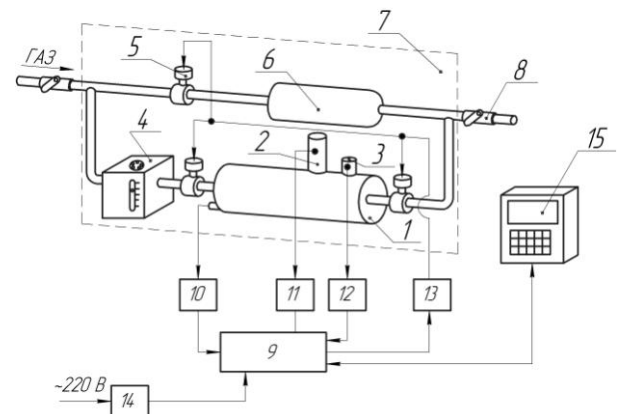
Однак, запропонований комплексний підхід до опосередкованого контролю енергетичних характеристик природного газу, який передбачає врахування кількох параметрів та вибору оптимального комплексу параметрів шляхом комп'ютерного моделювання за допомогою алгоритмів нейронних мереж, дозволяє проводити вимірювання теплоти згоряння природного газу без небажаного спалювання газу, що в свою чергу потребує додаткового підведення води та повітря, а також дотримання специфічних заходів безпеки. За допомогою даного методу можливою стала простежуваність якісних показників транспортованого та спожитого природного газу, вимірювання їх в режимі реального часу.

Таким чином, актуальним є завдання розроблення приладу для експрес-контролю теплоти згоряння природного газу, який буде базуватися на реалізації методу визначення питомої теплоти згоряння природного газу шляхом вимірювання акустичних параметрів

газу та вмісту окремих компонентів газу (діоксиду вуглецю), які суттєво впливають на його теплотворну здатність із застосуванням алгоритмів нейронних мереж (штучного інтелекту).

Висвітлення основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням одержаних наукових результатів.

З метою реалізації запропонованого методу визначення питомої теплоти згоряння сформовано ряд вимог до приладу для експрес-контролю теплоти згоряння природного газу та розроблено його технологічну схему (рис. 13).



1-вимірювальна камера, 2-блок давачів вологості, температури і тиску газу, 3-давач концентрації діоксиду вуглецю, 4-блок підготовки газу, 5-газовий електроклапан, 6-газовий ресивер, 7-вибохобезпечний корпус, 8-газовий кран, 9-блок вимірювання і контролю, 10-блок вимірювання швидкості ультразвуку в газі, 11-блок узгодження, 12-блок перетворення, 13-силовий блок, 14-блок живлення, 15-блок введення даних і індикації

Рисунок 13 - Технологічна схема інформаційно-вимірювальної системи для експрес-контролю питомої теплоти згоряння природного газу.

В основі принципу дії приладу є оброблення інформації ультразвукового перетворювача та давача концентрації діоксиду вуглецю і розрахунку теплоти згоряння природного газу за допомогою розроблених алгоритмів штучних нейронних мереж та видачі результатів.

Прилад призначений для дискретного (1-вимірювання на 5-ть хв) експрес-контролю питомої теплоти згоряння природного газу в газовій мережі. Даний прилад вмикається між газовою мережею і споживачем газу.

Функціонує прилад наступним чином. Спочатку виконується продувка вимірювальної камери 1 для видалення залишків вологи, повітря (попередньої газової проби), для

реалізації цієї операції за допомогою електроклапана 5 перекривається основна лінія подачі газу і відкривається байпасна лінія, в яку увімкнена камера вимірювання 1. Через блок підготовки газу 4 (механічна фільтрація, осушка і встановлення витрати газу) підготовлений газ поступає у вимірювальну камеру 1. Продувка камери виконується до досягнення мінімального значення вологості і стабілізації тиску і температури в камері, що контролюється за допомогою блоку давачів 2. Для згладжування пульсації тиску газу зі сторони споживача, які виникають при перемиканні газових електроклапанів, використовується газовий ресивер 6. Після операції продувки заповнена газом вимірювальна камера за допомогою електроклапанів відсікається і відкривається електроклапан на основній лінії подачі газу до споживача.

Наступною операцією є вимірювання інформативних параметрів природного газу – швидкості поширення ультразвукових коливань в газі (дана операція виконується за допомогою ультразвукового перетворювача, який вбудований у вимірювальну камеру 1 і електронного блоку вимірювання швидкості ультразвуку 10) і концентрації діоксиду вуглецю (дана операція здійснюється за допомогою давача концентрації діоксиду вуглецю 3 і блоку перетворення 12). Керування газовими електроклапанами 6 через силовий блок 13 і вимірювання швидкості ультразвуку в газі, концентрації діоксиду вуглецю, температури, вологості і тиску газу у вимірювальній камері 1 здійснюється за допомогою блоку вимірювання і керування 9. Інформаційні сигнали від блоків 10, 11 і 12 надходять в блок вимірювання і керування для подальшої обробки.

За заданим алгоритмом і на основі значень інформативних параметрів в блоці 9 проводиться розрахунок питомої теплоти згоряння природного газу, який відібраний у вимірювальній камері 1. Введення додаткових даних (поправочні коефіцієнти, дискретність відбору газової проби і т.п.) і вивід значення питомої теплоти згоряння природного газу здійснюється за допомогою блоку введення даних і індикації 15.

Газове обладнання приладу для експрес-контролю теплоти згоряння газу монтується у вибухобезпечному корпусі 7 і живиться система від електричної мережі за допомогою блоку живлення 14.

Для оброблення інформації, яка отримана з перетворювачів вимірювальної камери, служить блок оброблення інформації, який виконує такі функції:

- аналого-цифрового перетворення інформаційних сигналів вимірювальних перетворювачів вимірювальної камери;
- формуванням збуджуючого імпульсу та визначення часу повернення відбитого імпульсу ультразвукового перетворювача вимірювальної камери;
- формування сигналів керування аналого-цифровим перетворювачем відповідно до часових діаграм його роботи;
- формування адрес для збереження результатів аналого-цифрового перетворення інформаційних сигналів;
- формування сигналів керування та запис значень інформаційних сигналів;
- розрахунок теплоти згоряння природного газу за одержаними вимірювальними даними відповідно до алгоритму розрахунку, що знаходиться в пам'яті мікроконтролера;
- виведення на індикацію розрахункових значень.

ВИСНОВКИ

Отже, запропонований прилад для експрес-контролю теплоти згоряння природного газу забезпечуватиме визначення наступних параметрів: нижча теплота згорання, швидкість поширення звуку, а також густина природного газу. Експериментальний взірєць приладу буде реалізовувати одночасне визначення швидкості поширення звуку в газі та вмісту діоксиду вуглецю. Конструктивно прилад передбачено виготовити у портативному вигляді. Передбачена комплектація приладу портативним комп'ютером із спеціалізованим програмним забезпеченням, призначеним для оброблення, зберігання та передавання вимірювальної інформації. У перспективі можливе комплексування приладу газовим витратоміром, що дозволить визначати потік енергії відповідно до ДСТУ ISO 15112.

1. Мотало А. Теоретичні та практичні задачі кваліметрії природного газу/ А. Мотало, Б. Стадник, В. Мотало, І. Петровська // *Вимірювальна техніка та метрологія*, 2005. – Вип. 65. – С. 81-86. 2. Мотало А.В. Комплексне оцінювання якості природного газу як енергоносія / А.В. Мотало // *Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка"*. – 2008. – № 608. – С. 137-142. 3. *Укртрансгаз розпочинає публікацію паспортів якості природного газу який транспортується споживачам [електронний ресурс]*. – Режим доступу: <http://utg.ua/utg/business-info/yakst-gazu.html>. 4. *Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия* :

Proceedings of "FLOMEKO 2000" International Conference, Salvador, Brazil, 4 to 8 June 2000. 32. ISO 12213.3:2006 Natural Gas - Calculation of Compression Factor. Part 1: Introduction and Guidelines; Part 3: Calculation Using Physical Properties. ISO 12213 International Standard. 33. M. Jaeschke, P. Schley, R. Janssen-van Rosmalen, K. Koreman and H. J. Panneman: High-Accuracy Energy Determination of Natural Gas Using Physical Properties. Proceedings of 2001 International Gas Research Conference, Amsterdam, The Netherlands, 5 to 8 November 2001. 34. J. Kastner and P. Schley: Novel Optical Techniques for Process Analysis of Natural Gas Quality, 3rd Conference on Optical Analysis Technology, VDI, Düsseldorf, Germany, 26 to 27 February 2002. 35. EMC 500, Technical Data Sheet, RMG Messtechnik, Butzbach, Germany. 36. K. R. Wild and D. L. Ehrich: Energy Metering Technologies, Proceedings of 2001 International Gas Research Conference, Amsterdam, The Netherlands, 5 to 8 November 2001. 37. K. R. Wild: Controlling Processes that are Sensitive to Natural Gas Quality, Proceedings of World Gas Conference 2000, IGU, Nice, France. 38. GAS COMPOSITION ANALYSIS FOR NATURAL GAS AND BIOGAS

APPLICATIONS/ MEMS AG, Bruggerstrasse 30, 5413 Birmenstorf SWITZERLAND [електронний ресурс]. – режим доступу: <http://www.mems.ch/mems-deutsch/index.php>. 39. Дарвай І.Я. Експрес метод контролю якості природного газу: дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.11.13 "Прилади і методи контролю та визначення складу речовин". – Львів, 2010. - 154 с. 40. Патент на винахід UA 92846. Спосіб експрес-визначення теплоти згоряння природного газу / Карнаш О.М., Дарвай І.Я., Карнаш М.О., Яворський А.В., Рибіцький І.В. (Україна). – Опубл. 10.12.2010, Бюл.№ 23, 2010р. 41. Патент на полезную модель RU 121938. Устройство для определения теплоты сгорания природного газа / Карнаш М.О. (UA), Рибіцький І.В. (UA), Яворский А.В. (UA), Юрьев Э.В. (RU). – Зареєстровано в Госреестре полезных моделей РФ 10.11.2012г.

Поступила в редакцію 17.11.2016 р.

Рекомендували до друку: докт.техн.наук, проф. Райтер П.М., докт. техн. наук, проф. Середюк О.Є.