

УДК 681.621

DOI: 10.31471/1993-9981-2019-2(43)-78-87

## **АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ В УКРАЇНІ ТА ЗА КОРДОНОМ**

*Х. М. Шинкарук*

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15*

*e-mail: [kh.shynkaruk@mail.com](mailto:kh.shynkaruk@mail.com)*

У зв'язку з підвищенням цін на природний газ актуальним питанням є розрахунок не лише кількості спожитого газу, а і його якості саме у споживача. Якість газу - це відповідність його фізико-хімічних показників встановленим нормативним документам. При існуючій в Україні системі обліку та сплати за газ споживачі, використовуючи однакову кількість кубометрів, отримують різну теплоту згоряння.

В роботі проведено аналіз нормативного забезпечення оцінювання енергетичних показників природного газу. Обґрунтовано необхідність переходу до обліку природного газу в енергетичних одиницях. Розглянуто існуючі методи та засоби визначення теплоти згоряння природного газу, які використовуються в Україні та за кордоном. На даний час для визначення теплоти згоряння природного газу використовують прямі та опосередковані методи. Найбільш поширеним є розрахунковий метод заснований на хроматографічному аналізі, для реалізації якого необхідне дороговартісне обладнання. Іншими методами визначення теплоти згоряння природного газу є кореляційні. Суть яких полягає у встановленні взаємозв'язків між певною фізико-хімічною властивістю природного газу та тепловою згоряння, які можуть бути встановлені експериментальними спостереженнями та на основі теоретичного аналізування що дає можливість зробити висновок щодо теплоти згоряння природного газу. На основі проведеного аналізу встановлено що на даний час відсутні прості за конструкцією та не дорогі засоби контролю якісних характеристик природного газу, що серійно випускаються. Тому актуальним є вирішення проблеми оперативного контролю якості природного газу, шляхом наукового обґрунтування, розроблення і вдосконалення засобів, які забезпечують можливість опосередкованого обліку енергетичної цінності природного газу у відповідності до світових тенденцій обліку енергоресурсів.

Проведено кореляційний аналіз для встановлення залежності між теплопровідністю та теплотворною здатністю природного газу. Запропоновано використання термokatалітичного методу для визначення теплотворної здатності газу, що дозволить спроектувати відносно дешевий та простий у використанні прилад для контролю якості природного газу саме у споживача.

Ключові слова: природний газ, теплота згоряння природного газу, теплопровідність .

В связи с повышением цен на природный газ актуальным вопросом является расчет не только количества потребленного газа, но и его качества именно у потребителя. Качество газа - это соответствие его физико-химических показателей установленным нормативным документам. При существующей в Украине системе учета и оплаты за газ потребители, используя одинаковое количество кубометров, получают различную теплоту сгорания.

В работе проведен анализ нормативного обеспечения оценки энергетических показателей природного газа. Обоснована необходимость перехода к учету природного газа в энергетических единицах. Рассмотрены существующие методы и средства определения теплоты сгорания природного газа, которые используются в Украине и за рубежом. В настоящее время для определения теплоты сгорания природного газу используют прямые и косвенные методы. Наиболее распространенным является расчетный метод основан на хроматографическом анализе, для реализации которого необходимо дорогое оборудование. Другими методами определения теплоты сгорания природного газу является корреляционные. Суть которых заключается в установлении взаимосвязей между определенной физико-химическим свойством природного газу и теплотой сгорания, которые могут быть установлены экспериментальными наблюдениями и на основе теоретического анализа что дает возможность сделать вывод о теплоты сгорания природного газу. На основе проведенного анализа установлено, что в настоящее время отсутствуют простые по конструкции и не дорогие средства контроля качественных характеристик природного газу серийно выпускаемых. Поэтому актуальным является решение проблемы оперативного контроля качества природного газу, путем научного обоснования, разработки и совершенствования средств, обеспечивающих возможность опосредованного учета энергетической ценности природного газу в соответствии с мировыми тенденциями учета энергоресурсов.

Проведен кореляційний аналіз для встановлення залежності між теплопровідністю і теплотворною здатністю природного газу. Предложено використання термокаталітичного методу для визначення теплотворної здатності газу, що дозволить спроектувати відносно дешевий і простий в використанні прилад для контролю якості природного газу саме у споживача.

Ключові слова: природний газ, теплота згорання природного газу, теплопровідність.

In connection with the increase in prices for natural gas, the urgent issue is to calculate not only the amount of gas consumed, but also its quality precisely with the consumer. The quality of gas is the compliance of its physicochemical parameters with established regulatory documents. With the current gas accounting and payment system in Ukraine, consumers using the same number of cubic meters receive different heat of combustion.

The paper analyzes the regulatory framework for assessing the energy performance of natural gas. The necessity of the transition to accounting for natural gas in energy units is substantiated. Existing methods and means for determining the calorific value of natural gas that are used in Ukraine and abroad are considered. Currently, direct and indirect methods are used to determine the calorific value of natural value of natural gas. The most common is the calculation method based on chromatographic analysis, the implementation of which requires expensive equipment. Other methods for determining the calorific value of natural gas is correlation. The essence of which is to establish the relationship between a certain physicochemical property of natural gas and calorific value, which can be established by experimental observations and based on theoretical analysis, which makes it possible to draw a conclusion about the calorific value of natural gas. Based on the analysis, it was found that currently there are no simple in design and not expensive means of controlling the qualitative characteristics of natural gas commercially available. Therefore, it is relevant to solve the problem of operational control of the quality of natural gas, through scientific justification, development and improvement of tools that enable the indirect accounting of the energy value of natural gas in accordance with global trends in energy accounting.

A correlation analysis was carried out to establish the relationship between the thermal conductivity and the calorific value of natural gas. The use of the thermocatalytic method for determining the calorific value of gas is proposed, which will allow designing a relatively cheap and easy-to-use device for monitoring the quality of natural gas specifically for the consumer.

Key words: natural gas, calorific value of natural gas, thermal conductivity.

**Вступ.** Враховуючи світовий досвід при обліку природного газу актуальним є питання визначення об'єму чи об'ємної витрати з врахуванням енергетичних характеристик природного газу. Основним показником якості природного газу, який визначає його енергетичну цінність, є питома об'ємна теплота згорання (або теплотворна здатність) газу. Її визначають як кількість тепла, що виділяється у процесі повного згорання газу в повітрі при сталому тиску і сталій температурі, віднесеного до об'єму сухого газу, визначеного за стандартних умов. На даний час у світі найбільш вживаною одиничною мірою, що характеризує процес горіння газу, є число Воббе – характеристика горючого газу, яка визначає взаємозамінність горючих газів при спалюванні їх на побутових і промислових пристроях для горіння. Число Воббе визначається, як відношення значення вищої об'ємної теплоти згорання при певних стандартних умовах, до квадратного кореня відносної густини при тих самих умовах [1].

**Аналіз сучасних вітчизняних та закордонних досліджень і публікацій.** В Україні вимоги до фізико-хімічних показників природного газу повинні відповідати нормативному документу [2], згідно з яким теплота згорання не повинна бути меншою за 7600 ккал (31,8МДж), а число Воббе повинно знаходитись в межах від 9850 до 13000 ккал/м<sup>3</sup> (41,2-54,5 МДж/м<sup>3</sup>).

Як видно з аналізу якості газу, що опубліковує НАК “Нафтогаз України” на своєму сайті [3] протягом січня 2019 року середнє значення теплоти згорання природного газу коливається в межах від 8139 до 8252 ккал/м<sup>3</sup>. Якість газу оцінює Укртрансгаз за допомогою хіміко-аналітичних лабораторій та потокових автоматичних хроматографів. Якщо у споживача виникають сумніви щодо достовірності інформації він має право згідно [4] вимагати від газопостачальної компанії додаткове проведення забору газу для оцінки його якості. В разі не відповідності фізико-хімічних показників встановленим вимогам компанія повинна компенсувати споживачу всі

витрати та здійснити перерахунок за спожитий газ. Якщо показники якості газу в нормі споживач сам сплачує за проведений аналіз, який є дорогою вартісною процедурою.

26 січня 2017 року Національна комісія з регулювання енергетики і комунальних послуг України прийняла постанову №84 "Про затвердження Змін до деяких постанов НКРЕКП про введення на ринку природного газу використання одиниць енергії"[5]. Згідно з постановою у платіжних документах споживачів облгази повинні додатково вказувати розмір середньозваженої вищої теплоти згорання за розрахунковий період та обсяг енергії спожитого природного газу. Проте споживачі продовжують платити лише за спожитий об'єм газу. В той же час в країнах Європи постачальник газу відправляє споживачу рахунок, в якому вказано спожиту кількість газу в кубічних метрах і теплота згорання. Згідно зазначених показників визначають кількість і якість газу, яку споживач повинен оплатити. У таких країнах, як США та Бразилія, обсяги спожитого газу обчислюються не в метрах кубічних, як в Україні, а в енергетичних одиницях – МДж або кВт, тобто лише з врахуванням теплотворності спожитого газу.

Для переходу до обліку газу з врахуванням його якісних характеристик необхідно застосування нових засобів для вимірювання спожитого об'єму з застосуванням засобів потокового контролю якісних характеристик природного газу, які визначають його енергетичні властивості. Основною проблемою є відсутність спеціального обладнання контролю теплотворної здатності природного газу, яка б дозволила контролювати якість газу саме у споживача.

**Виклад основного матеріалу.** Для визначення теплоти згорання природного газу згідно [6,7] використовують прямі та непрямі методи. Прямим є калориметричний метод, суть якого полягає у вимірюванні кількості теплоти, яка виділяється при повному згорянні газу. До непрямих методів відносять розрахунковий, який базується на визначенні теплоти згорання на основі хроматографічного аналізу компонентного складу природного газу. Також для визначення теплоти згорання природного газу використовують кореляційні методи, в

основу яких покладена кореляційна залежність між фізичними властивостями природного газу та його теплотою згорання.

Розглянемо детальніше прилади хроматографічного аналізу складу газу.

Мікрохроматограф Micro GC Fusion (рисунок 1) - оптимальний прилад для розширеного аналізу природного газу, як в лабораторних умовах, так і безпосередньо на об'єктах[8].



**Рисунок 1 - Мікрохроматограф INFICON Micro GC Fusion.**

Основні характеристики

- Швидке програмування температурних режимів, що дозволяє виконувати аналіз фракцій C12 +
- МЕМС-катарометр, що забезпечує в 10 разів вищу чутливість аналізу в порівнянні зі звичайним катарометром.
- Вбудований світлодіодний сенсорний дисплей з діагоналлю 15 см і підсвічуванням, що забезпечує інтуїтивно зрозуміле управління приладом і відображення всіх режимів роботи
- Інтелектуальний графічний інтерфейс в поєднанні з Wi-Fi, що дозволяє управляти приладом за допомогою будь-якого комп'ютерного обладнання з можливістю роботи в мережі
- Модульна конструкція, що полегшує адаптацію приладу до вирішення конкретних завдань, його технічне обслуговування та інтеграцію з типовими комплектуючими.
- Компактний корпус з вбудованим кондиціонером проб (поставляється додатково) забезпечує точний газо-хроматографічний аналіз в лабораторних умовах, на об'єктах або в пересувних лабораторіях.

Перевагами мікрохроматографа INFICON Micro GC Fusion компактна, транспортабельна конструкція, що дозволяє виконувати точний, своєчасний аналіз в потрібному місці і в потрібний час. Використовує перевірену технологію газової мікрохроматографії і обладнаний можливістю швидкого програмування температурного режиму, прилад виконує аналіз фракцій C12 + в газоподібному стані з високою точністю і відтворюваністю результатів. Чутливий, інтелектуальний і простий у використанні.

Хроматограф газовий Encal3000, розроблений фірмою ELSTER INSTROMET (Німеччина), призначений для визначення компонентного складу природного газу з подальшим розрахунком, на підставі отриманих за складом даних вищої та нижчої теплоти згорання, густини газу та числа Воббе [9].



**Рисунок 2 - Газовий хроматограф Encal 3000**

Хроматограф – автономний автоматичний прилад безперервної дії з детектором теплопровідності і капілярної колонки, з функцією автоматичної калібровки, пристроями пам'яті і доступною для користувача системою діагностики. У пам'яті приладу зберігаються дані за останні 35 діб роботи, включаючи аварійну сигналізацію. Для обміну даними в хроматограф Encal 3000 має вихідні сигнали для зв'язку за протоколами TCP/IP і MODBUS для підключення до зовнішнього обладнання та комп'ютера. Хроматограф має вибухозахищене виконання і ступінь захисту від впливу навколишнього середовища, що дає можливість встановлювати його в польових умовах якомога ближче до пробовідбірників, виключаючи додаткові витрати на систему регулювання температури.

Недоліками хроматографа Encal 3000 є необхідність використання гелію в якості газу-носія.

Газовий хроматограф «Кристаллюкс-4000М» [10] повністю автоматизований, починаючи від введення проби і закінчуючи обробкою хроматографічної інформації. В хроматографі (рисунок 3) реалізовані функції автоматичного регулювання температури термостатів, витрат і тиску газу-носія (система ЕУПГ), допоміжних газів, автоматичного підпалу детекторів, контроль горіння полум'я в процесі роботи, вимірювання сигналів детекторів за допомогою 24-розрядного АЦП.



**Рисунок 3 – Газовий хроматограф Кристаллюкс4000М**

Форма подання інформації - інтерфейс RS232; обробка хроматографічної інформації проводиться за допомогою програми «Netchrom».

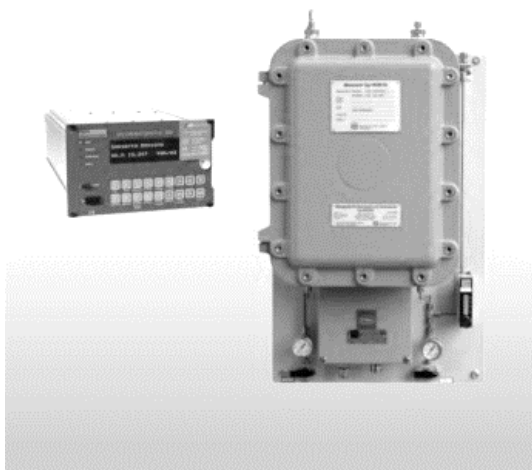
Витрата газу-носія не більше 100мл / хв; вхідний тиск не більше 0,4МПа.

Оскільки хроматографи в основному є лабораторними засобами, визначення теплоти згорання природного газу таким методом є можливим лише на великих пунктах обліку природного газу за умов наявності дорогого обладнання тому не може бути застосований при виконанні вимірювань безпосередньо побутових споживачів.

Інший підхід до визначення теплотворної здатності природного газу базується на вимірюванні кількості теплоти, яка виділяється при повному згоранні газу.

Газовий калориметр EMC 500 виробництва компанії RMG [11] призначений для

вимірювання теплотворної здатності (калорійності), нормальної густини, числа Воббе і кількості двоокису вуглецю CO<sub>2</sub> в природному газі і в інших горючих газах (рисунок 4).



**Рисунок 4 – Газовий калориметр EMC 500**

Газовий калориметр EMC 500 є більш дешевою альтернативою газової хроматографії. Прилад може застосовуватися в якості вимірювача калорійності в локальних газових мережах, на газовимірювальних і газорозподільних станціях, в вузлах обліку окремих споживачів газу в різних галузях промисловості для проведення комерційних розрахунків за природний газ. Також EMC 500 застосовують в різних технологічних процесах, пов'язаних з виробництвом або спалюванням великих обсягів газу і вимагають вимірювання і контролю його калорійності, нормальної густини і числа Воббе.

Калориметр EMC 500 складається з вимірювального блоку WOM 02, в який входять два термістора, інфрачервоний датчик, блок клапанів, фільтр, регулятор тиску, плата перетворення і спеціалізований обчислювач GC 9000. Вимірювальний блок кріпиться на монтажній панелі і поставляється у вибухозахищеному або звичайному виконанні. Обчислювач вбудовується в електрошкафу.

Два термістора, що знаходяться в термостатичному вузлі, вимірюють теплоємність, теплопровідність і густину газу. На підставі цих вимірювань обчислюються об'ємна теплота згорання і число Воббе.

Густина газу визначається за допомогою вимірів перепаду тиску на гідравлічному опорі, виконаному у вигляді капілярної трубки, вміст CO<sub>2</sub> - за допомогою інфрачервоного датчика.

Перевагами калориметрів типу EMC 500 є: висока точність вимірювань (<0,5%); метод вимірювання реалізований без спалювання вимірюваного газу, таким чином відсутня небажане виділення теплоти і не потрібно підведення повітря; коливання атмосферного тиску і температури навколишнього середовища не впливають на точність вимірювань, тому не вимагається термостабілізація приміщення; не вимагає підведення газу-носія і інших допоміжних газів; простота і зручність в експлуатації.

Недоліком даного пристрою є використання метану для автоматичного калібрування.

Газові калориметри CWD 2000, CWD 2005 [12], виготовлені фірмою UNION Apparatebau GmbH (Німеччина) призначені для визначення об'ємної теплоти згорання горючих газів, у тому числі природного.

CWD 2000 (рисунок 5) - це високошвидкісний калориметр згорання з невеликим промисловим персональним комп'ютером і великим цифровим дисплеєм, підключеним до камери згорання. Вимірювання проводиться в режимі реального часу і засноване на залежності об'ємної теплоти згорання газу від його густини та числа Воббе (теплого еквівалента опалювального газу).

Суть методу полягає у вимірюванні теплоти, що виділилася з палика при спалюванні невеликої порції газу. Після спалювання газ змішується з охолодженим повітрям і вимірюється сенсорним давачем на термобатарей як збільшення температури. Мікропроцесор на основі ПК за відомою залежністю та з внесенням поправок розраховує теплотворну здатність газу.

Діапазон вимірювання: - об'ємної теплоти згорання, МДж/м<sup>3</sup> (Мкал/м<sup>3</sup>) 2,5...50,0 (0,6...12,0); - числа Воббе, МДж/м<sup>3</sup> (Мкал/м<sup>3</sup>) 2,5...55,0 (0,6...13,1)

Діапазон витрати газу (в залежності від властивостей газу), л/год – 8...200.

Габаритні розміри, мм (1016×762×330 мм); вагу (50,5 кг);

Діапазон робочих температур, °С (- 5...+40);

Умови експлуатації - відносна вологість повітря,%, не більше 80 діапазон температури навколишнього середовища, ° С від 10 до 38.



**Рисунок 5 - Калориметр CWD-200**

Недоліками калориметра CWD-200 є достатньо велика витрата газу для спалювання; значні габарити; обмежений температурний режим роботи; неможливість використання в польових умовах.

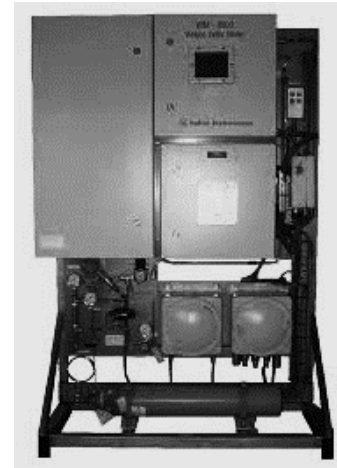
Вимірювач числа Воббе WIM 9900 (виробник HorbeInstruments B.V.", Нідерланди), призначений для вимірювання в безперервному режимі числа Воббе і відносної густини горючих газів, включаючи природний газ[13].

Вимірювач числа Воббе WIM 9900 являє собою вимірювальний комплекс з вбудованим мікропроцесором, що дозволяє здійснювати управління процесом спалювання горючого газу, проводити вимірювання обраних фізичних властивостей з одночасним виведенням на екран основних теплофізичних параметрів горючого газу: числа Воббе і відносної густини.

Конструктивно прилад виконаний у вигляді настінної шафи. Вимірювач складається з наступних блоків: електронний блок, термошафа і блок попередньої підготовки спалюваних газів. Контролер вимірювача функціонує на основі звичайного персонального комп'ютера з встановленим на ньому спеціальним програмним забезпеченням та графічним дисплеєм. Вбудований дисплей відображає параметри поточного режиму, значення вимірюваних параметрів і подає інформацію про виниклі неполадки.

Діапазон вимірювання числа Воббе: 0-100 МДж/м<sup>3</sup>; теплотворна здатність: 0-120МДж/м<sup>3</sup>; Точність вимірювання  $\pm 0,4\%$  для природного

газу,індекс витрати повітря: 0-25. Час відгуку – 5с. Температура навколишнього середовища -40 + 10°С.До недоліків калориметра WIM 9900 слід віднести значні габаритні розміри.



**Рисунок 6 - Вимірювач числа Воббе WIM 9900**

Загальним недоліком всіх калориметрів є потреба у спалюванні газу та значні масо-габаритні показники, що обмежує їх застосування для контролю якісних показників газу безпосередньо у споживача.

Аналізатор природного газу Elster GasLab Q2,(Виробник Honeywell Elster, Німеччина)[14]безполуменовий пристрій безперервної дії, призначений для визначення калорійності та числа Воббе в газових пробах. Принцип вимірювання аналізатора Elster GasLab Q2 заснований на кореляційному визначенні поглинання інфрачервоної частини спектра і теплопровідності проби газу.

Сфери застосування цього пристрою варіюються від комерційного обліку енергії до вимірювання, контролю та регулювання. Одною з основних областей застосування є управління газовими турбінами електростанцій з метою оптимізації ефективності, викидів забруднюючих речовин та навантаження системи при коливаннях якості газу. Іншим застосуванням є змішування газів для управління технічними характеристиками газу в процесі транспортування.

Корпус забезпечує вибухозахист для використання в небезпечній зоні і призначений для роботи в широкому діапазоні температур навколишнього середовища, що дозволяє

встановлювати аналізатор в безпосередній близькості від технологічного процесу (рисунк 7).



Honeywell Elster GasLab Q2

**Рисунок 7 – Аналізатор природного газу GasLabQ2.**

У режимі вимірювання пробний газ безперервно проходить через датчик і оновлює вимірювання кожну секунду. Для прискорення відбору проб в корпус вбудований байпасний витратомір. Пристрій має програмоване автоматичне калібрування, для якого використовують метан.

Портативний інфрачервоний аналізатор природного газу Gasboard-3110P



**Рисунок 8 - Аналізатор природного газу Gasboard-3110P.**

Gasboard-3110P - портативний аналізатор, який може бути використаний для онлайн-вимірювання складу природного газу та теплотворної здатності в режимі реального часу [15]. Газоаналізатор дозволяє одночасно вимірювати концентрацію CH<sub>4</sub>, C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>, CO<sub>2</sub>. Прилад оснащений спеціально розробленим давачем C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> для вимірювання суми вищих вуглеводнів, крім CH<sub>4</sub>.

Перевагами аналізатора Gasboard-3100P є висока швидкість, компактна і міцна

конструкція з постійним температурним корпусом (щоб уникнути впливу коливань температури та підвищити точність вимірювань), вбудована акумуляторна Li-іонна батарея, що робить можливим використання аналізатора в польових умовах.

Недоліком аналізатора є можливість аналізу складу лише очищеного газу (відсутність пилу, вологи, смоли).

Останнім часом темі контролю якості природного газу присвячено багато наукових робіт та запатентованих рішень.

У роботі [16] запропонований експрес метод визначення теплоти згорання газу, в основу якого покладено кореляційну залежність. Суть методу полягає в одночасному вимірюванні швидкості поширення ультразвуку в газі, вмісту діоксиду вуглецю і використанні штучних нейронних мереж в якості нелінійного апроксиматора теплоти згорання як функції зазначеного комплексу параметрів.

Інший підхід до визначення теплоти згорання природного газу через його компонентний склад є оптичний метод інфрачервої спектроскопії [17]. Суть якого полягає у вимірюванні інтенсивності поглинання природним газом інфрачервоних коливань, що проходять через нього. Даний метод реалізований з допомогою вимірювальної схеми, яка складається з трьох кільцеподібних кювет.

У роботі [18] обґрунтовано можливість використання парціального витратоміра із термочутливим давачем для визначення теплоти згорання природного газу шляхом використання коефіцієнта тепловіддачі як інформативного параметра при його функціонуванні.

Альтернативними до вище наведених методів та засобів для визначення теплоти згорання природного газу є кореляційні методи, суть яких полягає у непрямому визначенні теплоти згорання природного газу. Вимірюючи певну фізико-хімічну властивість природного газу та використовуючи відомі взаємозв'язки між теплою згорання і вимірною властивістю, які можуть бути встановлені як за експериментальними спостереженнями, так і на основі теоретичного аналізування, дають можливість зробити висновок щодо теплоти згорання природного газу.

В основі кореляційних методів вимірювання лежить вимірювання різних фізико-хімічних параметрів газової проби, а саме: загальна концентрація вуглеводнів, концентрація діоксиду вуглецю, теплопровідність, теплоємність, діелектрична проникність, швидкість поширення ультразвуку в газовій пробі, динамічна в'язкість. Підбір і поєднання даних параметрів (як правило від 2 до 4 інформативних параметрів) в найкращу кореляційну залежність, яка отримується на різних тестових газових сумішах, що моделюють природний газ з різною теплотою згорання, дозволяє отримати емпіричну залежність за допомогою якої «кореляційні» прилади дозволяють проводити вимірювання на реальному потоці природного газу.

Як відомо, природний газ складається з вуглеводнів близько на 90%, найбільша частка належить метану CH<sub>4</sub>. Також в складі газу є важчі вуглеводні - етан, пропан, бутан та пентан. Іншими компонентами, що входять до складу природного газу є азот і вуглекислий газ, в невеликій кількості вони не є шкідливими проте не мають теплотворної здатності. Наявність в газі негорючих компонентів (водяної пари) мають негативний вплив на теплоту згорання, тому що частина енергії витрачається на підігрів їх до температури згорання. Всі ці компоненти природного газу по-різному впливають на його теплотворну здатність.

Розглянемо вплив теплопровідності газової суміші на його теплотворну здатність. Для встановлення кореляційної залежності було відібрано 20 зразків природного газу відомого складу та відомої теплоти згорання на основі хроматографічного аналізу. [3]

Теплопровідність природного газу розраховувалася як теплопровідність суміші газів, що входять до його складу. Для цього застосовувалося рівняння [19]:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \lambda_i}{\sum_{j=1}^n y_j A_{ij}}, \quad (1)$$

де  $\lambda_i$ ,  $\lambda_j$  – теплопровідність природного газу і його  $i$ -тих компонент відповідно;

$y_i$ ,  $y_j$  – мольні долі  $i$ -их і  $j$ -их компонентів, яким відповідно присвоюються вказані індекси і

які розраховувалися відповідно до заданих об'ємних концентрацій газу.

Параметр  $A_{ij}$  для формули (1) розраховувався за алгоритмом [19]:

$$A_{ij} = \frac{(1 + (\lambda_i/\lambda_j)^{1/2} (M_i/M_j)^{1/4})^2}{(8 \cdot (1 + M_i/M_j))^{1/2}}, \quad (2)$$

де  $M_i$ ,  $M_j$  – молекулярна маса  $i$ -их та  $j$ -их компонентів.

Мольні долі розраховувалися відповідно до заданих концентрацій компонент в складі газу, за відомою формулою:

$$y_i = \frac{r_i z_{ci}}{\sum r_i / z_{ci}}, \quad (3)$$

де  $r_i$  – об'ємна частка  $i$ -го компонента;

$z_{ci}$  – фактор стисливості  $i$ -го компонента газу за стандартних умов, який розрахований згідно [20].

На основі вибраних та розрахованих даних проведено кореляційний аналіз. Коефіцієнт кореляції складає - 0,821. Результати кореляційного аналізу свідчать про наявність взаємозв'язку між теплопровідністю та теплотою згорання. Неоднозначність впливу пояснюється тим, що в складі газу присутня певна кількість азоту та вуглекислого газу, які не мають теплотворної здатності проте мають високу теплопровідність.

Враховуючи вище наведене, для контролю теплоти згорання природного газу доцільно використовувати тепловий метод [21], який може бути реалізований за допомогою термокatalітичного давача, принцип дії якого заснований на безполуменовому спалюванні (окисленні) газу на поверхні кatalітично активного елемента і вимірюванні кількості тепла, що виділилося при цьому. Даний метод може використовуватися лише для горючих газів, тому виключає вплив не теплотворних компонент на результат вимірювання.

**Висновки:** В даний час оцінка теплотворної здатності природного газу в Україні та закордоном базується в основному на хроматографічному аналізі, а для точної оцінки в лабораторних умовах широко використовуються калориметри. Для забезпечення можливості оцінки теплотворної здатності природного газу безпосередньо споживачами запропоновано ряд методів, зокрема термокatalітична кондуктометрія.



Використання методів, в основу яких покладено теплопровідність дасть можливість спроектувати відносно дешевий та простий у використанні прилад для контролю якості природного газу саме у споживача.

#### Список використаних джерел

1. Газы горючие природные. Расчетный метод определения теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе: ГОСТ 22667-82. – [Дата введения 01.07.83]. – М.: Издательство стандартов, 1982. – 4 с. – (Государственный стандарт Союза ССР).

2. Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия : ГОСТ 5542-87. - - [Действует от 1988-01- 01]. – М.: Госстандарт изд-во стандартов, 1987. – 3 с.

3. АТ «Укртрансгаз». Паспорти якості природного газу, що подається споживачам [електронний ресурс].- Режим доступу: <http://utg.ua/utg/business-info/yakst-gazu.html>.

4. Кодекс газорозподільних систем: від 30.09.2015 р. №2494/Постанова національної комісії, що здійснює технічне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг – Режим доступу:<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1379-15>.

5. Постанова №84 "Про затвердження Змін до деяких постанов НКРЕКП про введення на ринку природного газу використання одиниць енергії".

6. ГОСТ 27193-86 «Газы горючие природные. Метод определения теплоты сгорания водяным калориметром».

7. ГОСТ 22667-82 «Газы горючие природные. Расчетный метод определения теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе».

8. Micro GC Fusion Gas Analyzer/ [електронний ресурс].- Режим доступу:<https://products.inficon.com/en-us/navigation/products/product/detail/micro-gc-fusion-gas-analyzer/>

9. Поточный газовый хроматограф Encal 3000/- Режим доступу: <https://docuthek.kromschroeder.com/documents/download.php?lang=de&doc=33415>

10. Газовый хроматограф Кристаллюкс-4000M/ [електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.meta->

[chrom.ru/catalog/chromatographs/crystallux-4000m/](http://chrom.ru/catalog/chromatographs/crystallux-4000m/)

11. Газовий калориметр для природного газу EMC 500/ [електронний ресурс].-Режим доступу:[http://promatis.ru/shop/30\\_Gazovyj\\_kalorimetr\\_dlya\\_prirodnogo\\_gaza\\_EMC500.html](http://promatis.ru/shop/30_Gazovyj_kalorimetr_dlya_prirodnogo_gaza_EMC500.html)

12. Газові калориметри CWD 2000, CWD 2005/ UNION Apparatebau GmbH[електронний ресурс].-Режим доступу [https://avtomatika.info/wpcontent/uploads/2016/10/CWD\\_rus\\_folder\\_2014\\_05\\_V1.00.pdf](https://avtomatika.info/wpcontent/uploads/2016/10/CWD_rus_folder_2014_05_V1.00.pdf)

13. Вимірювач числа Воббе WIM 9900 /HorbeInstruments B.V., [електронний ресурс].- Режим доступу:[https://www.hobre.com/files/products/WIM9900\\_incl\\_SG\\_Cell\\_rev.2\\_0.pdf](https://www.hobre.com/files/products/WIM9900_incl_SG_Cell_rev.2_0.pdf)

14. Аналізатор GasLab Q2/ Honeywell Elster/- Режим доступу: <https://www.honeywellprocess.com/library/marketing/tech-specs/Elster-GasLabQ2-Datasheet.pdf>

15. Portable Natural Gas Analyzer-Gasboard-3110P/[електронний ресурс].-Режим доступу<http://www.gasalyzer.com.cn/en/product/s/syngas/050932017.html>

16. Дарвай І.Я. Теоретичне обґрунтування методу визначення теплоти згоряння природного газу // Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції та виставки. – Івано-Франківськ, 20-23 жовтня 2009 р., С.105.

17. Романів В.М. Дослідження експериментального зразка системи контролю енерговмісту природного газу / В.М. Романів, С.А. Чеховський // Метрологія та прилади. – 2014. – № 1. – С. 192- 196

18. Малісевич В.В. Метрологічна модель напірного витратоміра при контролі енергетичної цінності природного газу / В.В. Малісевич, О.С. Середюк, Д.О. Середюк // Український метрологічний журнал. – 2015. – № 1. – С. 58/

19. Рид Р. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд: Пер. с англ.: под ред. Б.И. Соколова. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.

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

21. Шинкарук Х. М. Застосування термодаталітичного методу для визначення теплотворної здатності природного газу / Х.М. Шинкарук, С.А. Чеховський // Системи обробки інформації. – 2018. – № 4(155). – С. 161-165

### References

1. Gazy goriychie prirodnye. Raschetnyy metod opredeleniya teploty sgoraniya, otnositelnoy plotnosti i chisla Vobbe: GOST 22667-82. – [Data vvedeniya 01.07.83]. M.: Izdatelstvo standartov, 1982. 4 p. – (Gosydarstvennyy standart Soiúza SSR).

2. Gazy goriychie prirodnye dlia promyshlennogo i kommýnalno-bytovogo naznacheniya. Tehnicheskie ýsloviya : GOST 5542-87. [Deistviyet ot 1988-01- 01]. M.: Gosstandart izd-vo standartov, 1987. 3 p.

3. АТ «Ýkrtransgaz». Pasportu yakosti prirodnoho gazý, o podaetsia spojivacham [elektronny resýrs]. URL: <http://utg.ua/utg/business-info/yakst-gazu.html>.

4. Kodeks gazorozpodilnih sistem: vid 30.09.2015 r. №2494/Postanova natsionalnoi komisii, o zdiisniue tehniche regýliývanniya ý sferah energetiki ta komýnalnih poslýg URL:<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1379-15>.

5. Postanova №84 "Pro zatverdjeniya Zmin do deiakih postanov NKREKP pro vvedeniya na rinky prirodnoho gazý vikoristanniya odinita energii".

6. GOST 27193-86 «Gazy goriychie prirodnye. Metod opredeleniya teploty sgoraniya vodiaym kalorimetrom».

7. GOST 22667-82 «Gazy goriychie prirodnye. Raschetnyy metod opredeleniya teploty sgoraniya, otnositelnoy plotnosti i chisla Vobbe».

8. Micro GC Fusion Gas Analyzer/ [elektronny resýrs]. URL: <https://products.inficon.com/en-us/nav-products/product/detail/micro-gc-fusion-gas-analyzer/>

9. Potochnyy gazovyy hromatografensal 3000/- URL: <https://docuthek.kromschroeder.com/documents/download.php?lang=de&doc=33415>

10. Gazovyy hromatograf Kristallýks-4000M URL: <https://www.meta-chrom.ru/catalog/chromatographs/crystallux-4000m/>

11. Gazovyy kalorimetr dlia prirodnoho gazý EMC 500. URL: <http://promatis.ru/shop/30>

\_Gazovyy\_kalorimetr\_dlya\_prirodnogo\_gaza\_EMC500.html

12. Gazovi kalorimetri CWD 2000, CWD 2005/ UNION Apparatebau GmbH. URL: [https://avtomatika.info/wpcontent/uploads/2016/10/CWD\\_rus\\_folder\\_2014\\_05\\_V1.00.pdf](https://avtomatika.info/wpcontent/uploads/2016/10/CWD_rus_folder_2014_05_V1.00.pdf)

13. Vimirývach chisla Vobbe WIM 9900 /HorbeInstruments B.V. URL: [https://www.hobre.com/files/products/WIM9900\\_incl\\_\\_SG\\_Cell\\_rev.2\\_0.pdf](https://www.hobre.com/files/products/WIM9900_incl__SG_Cell_rev.2_0.pdf)

14. Analizator GasLab Q2/ Honeywell Elster. URL: <https://www.honeywellprocess.com/library/marketing/tech-specs/Elster-GasLabQ2-Datasheet.pdf>

15. Portable Natural Gas Analyzer-Gasboard-3110P. URL: <http://www.gasanalyzer.com.cn/en/products/syngas/050932017.html>

16. Darvai I.Ya. Teoretichne obgruntuvanniya методу vyznachenniya teploty zghorianniya pryrodnogo hazu. *Naftohazova enerhetyka: problemy ta perspektivy: materialy Mizhnarodnoi naukovy-tekhnicnoi konferentsii ta vystavky.* – Ivano-Frankivsk, 20-23 zhovtnia 2009 r., P.105.

17. Romaniv V.M. Doslidzhenniya eksperymentalnoho zrazka systemy kontroliu enerhovmistu pryrodnogo hazu / V.M. Romaniv, S.A. Chekhovskiy. *Metrolohiya ta prylyady.* 2014. No. 1. P. 192 - 196

18. Metrolohichna model napirnoho vytratomira pry kontroli enerhetychnoi tsinnosti pryrodnogo hazu / V.V. Malisevych, O.Ye. Serediuk, D.O. Serediuk. *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal.* 2015. No 1. P. 58.

19. Svoystva gazov i zhidkostey: Spravochnoe posobie / R. Rid, Dzh. Prausnits, T. Shervud: Per. s angl.: pod red. B.I. Sokolova. L.: Himiya, 1982. 592 p.

20. Gaz prirodnyiy. Metodyi rascheta fizicheskikh svoystv, ego komponentov i produktov ego pererabotki. GOST 30319.1-96. [Vveden s 2000-01-01]. K.: Gosstandart Ukrainyi, 1999.16 p.

21. Shynkaruk Kh. M. Zastosuvanniya termokatalitychnoho методу dlia vyznachenniya teplotvornoï zdatnosti pryrodnogo hazu / Kh.M. Shynkaruk, S.A. Chekhovskiy. *Systemy obrobky informatsii.* 2018. No 4(155). P. 161-165