

## ОБҐРУНТУВАННЯ ЗМЕНШЕННЯ КІЛЬКОСТІ ІНФОРМАТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

<sup>1</sup> О.М.Карпаш, <sup>2</sup> І.Я.Дарвай

<sup>1</sup> ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, к. 1307, тел. (03422) 42430  
e-mail: mkarpush@nung.edu.ua

<sup>2</sup> ДП „Івано-Франківськстандартметрологія”, 76007, м. Івано-Франківськ, вул. Вовчинецька, 127,  
тел. (0342) 786596, e-mail: idarvaj@mail.ru

Обґрунтовано зменшення кількості інформативних параметрів для визначення теплоти згоряння природного газу. Результати дослідження в цьому напрямку засвідчили, що теплоту згоряння газу із задовільною точністю можна визначити за швидкістю поширення ультразвуку в газі та вмістом діоксиду вуглецю в природному газі. Виключення такого інформативного параметра, як вміст азоту суттєво не впливає на результати визначення теплоти згоряння. Досягнуто похибки обчислення - 5,56 %.

Ключові слова: теплота згоряння газу, вміст діоксиду вуглецю, швидкість поширення ультразвуку в газі

Обосновано уменьшение количества информативных параметров для определения теплоты сгорания природного газа. Результаты исследования в этом направлении показали, что теплоту сгорания газа с удовлетворительной точностью можно вычислить по скорости распространения ультразвука в газе и содержанию диоксида углерода в природном газе. Исключение такого информативного параметра, как содержание азота не влияет на результаты определения теплоты сгорания. Полученная погрешность вычисления составляет 5,56 %.

Ключевые слова: теплота сгорания газа, содержание диоксида углерода, скорость распространения ультразвука в газе

Description of argumentation for decrease informative parameters quantity investigation for gas heating value determination is done in this article. Research results showed that heating value of the natural gas could be achieved by simultaneous measurement of ultrasound speed and carbon dioxide concentration with satisfactory error. Exclusion of such parameter as nitrogen concentration didn't show significant influence on heating value determination results. Reached error is equal to 5.56 %.

Keywords: gas calorific value, dioxide carbon concentration, sound velocity in natural gas

На сьогоднішній день вимоги до значення теплоти згоряння природного газу в Україні регламентовано відповідно до міждержавного стандарту ГОСТ 5542 [1]. Вимірювання теплоти згоряння здійснюють за двома методами: розрахунковим методом (за компонентним складом природного газу, який визначають хроматографічним методом) та експериментальним методом (визначення теплоти згоряння за допомогою водяного калориметра) [2-4]. Аналіз переваг та недоліків цих методів вказав на необхідність розроблення нового експрес-методу визначення теплоти згоряння природного газу, який давав би змогу вимірювати цей показник в режимі реального часу без визначення повного компонентного складу газу, був порівняно недорогим та точним [5, 6].

Для вирішення цієї задачі було розроблено новий метод експрес-визначення теплоти згоряння природного газу, суть якого полягає у сумісному вимірюванні швидкості поширення ультразвуку в газі, вмісту азоту й діоксиду вуглецю та використанні штучних нейронних мереж - нелінійного апроксиматора теплоти згоряння як функції вказаного комплексу параметрів. Ці інформативні параметри були відібрані за допомогою кореляційного аналізу теплоти згоряння природного газу із рядом стандартних

фізико-хімічних параметрів природного газу, а саме: вмісту вуглеводнів (метан, етан, пропан, бутан та вищих вуглеводнів), густини, молярної маси, швидкості поширення ультразвуку в газі, вмісту діоксиду вуглецю та вмісту азоту [7, 8]. На рисунку 1 зображено схему процесу дослідження методу визначення теплоти згоряння природного газу.

### Кореляційний аналіз стандартизованих фізико-хімічних параметрів природного газу

Результати кореляційного аналізу вказали загалом на те, що теплота згоряння газу є нелінійною функцією комплексу таких параметрів, як швидкість поширення звуку в газі, вміст азоту та діоксиду вуглецю [7, 8]. Тому для визначення цієї характеристики необхідно було розв'язати задачу нелінійної апроксимації функції кількох параметрів. За рис. 1 правильність кореляційного аналізу необхідно перевірити на довідкових даних та на реальних даних.

### Перевіряння нового методу на довідкових даних

Для перевіряння методу було застосовано штучні нейронні мережі (ШНМ). Вхідні дані для



Рисунок 1 – Схема процесу дослідження нового методу визначення теплоти згоряння природного газу

мережі отримано з модифікованої бази даних 95 наборів зразків природного газу, значення параметрів якої отримані за хроматографічним методом [9]. Теплота згоряння зразків газу знаходиться в межах від 36,8151 МДж/м<sup>3</sup> до 42,9323 МДж/м<sup>3</sup>, густина – в межах від 0,71432 кг/м<sup>3</sup> до 0,82894 кг/м<sup>3</sup>, концентрація діоксиду вуглецю та азоту змінюється від 0,44% до 6% та від 0,97% до 7,40% відповідно, молекулярна маса – від 16,3285 до 19,4907. Вуглеводневі компоненти знаходяться в таких діапазонах: метан – від 83,4187 до 98,2722 моль%; етан – від 1,0118 до 9,5284 моль%, пропан – від 0,2128 до 3,5694 моль%, *i*-бутан – від 0,03552 до 0,64740 моль%, *n*-бутан – від 0,02368 до 0,43160 моль%, *i*-пентан – від 0,01386 до 0,16740 моль%, *n*-пентану – від 0,00628 до 0,08360 моль%, *n*-гексан – від 0,003 до 0,0654 моль%, *n*-гептану – від 0 до 0,0260 моль%, *n*-октан – від 0 до 0,0235 моль%.

Для тренування ШНМ було обрано алгоритм Левенберга-Марквардта, оскільки його застосування рекомендують для випадків, коли мережа та кількість навчальних пар у множині є невеликими (менше тисячі) [10].

Моделювання з використанням ШНМ передбачає загалом виконання послідовності таких кроків:

1. Визначення вхідних та вихідних параметрів.
2. Збір даних.
3. Аналіз та попереднє оброблення даних.
4. Тренування нейронної мережі.
5. Тестування натренованої мережі.
6. Використання відтестованої мережі для моделювання та прогнозування.

Вихідним параметром для ШНМ була теплота згоряння природного газу, а на вхід ШНМ було подано комплекс обраних інформативних параметрів. Для виконання трьох останніх кроків необхідно мати незалежні набори даних (тренування, тестування та апробації мережі), тому на підставі досвіду дослідників та згідно з рекомендаціями в літературних джерелах модифіковану базу даних було розділено на 3 частини: для тренування обрано 78 варіацій якісних показників газу, для тестування – 8 (які не входили до 78 тренувальних пар), для моделювання – 9 (які не входили до жодного з попередніх наборів) [11].

Теплота згоряння природного газу, яку отримано в результаті моделювання роботи штучної нейронної мережі, відповідає фактичним значенням теплоти згоряння газу, які отримані за хроматографічним методом. Приведена до діапазону похибка визначення теплоти згоряння за допомогою довідкових даних склала 2,4 % [12].

### **Дослідження нового методу на реальних даних**

Для підтвердження спроможності реалізації запропонованого методу було проведено дослідження на реальних значеннях параметрів природного газу зі сертифікатів якості на при-

родний газ, які визначено на одному з підприємств Івано-Франківської області. Всього було одержано 8 сертифікатів якості, значення параметрів у яких визначено за хроматографічним способом. Швидкість поширення ультразвуку в природному газі обчислено за ГОСТ 30319.1 та ГОСТ 30319.2 [13, 14].

Підтвердження спроможності реалізації нового методу проведено за допомогою ШНМ, яку було використано для перевіряння результатів кореляційного аналізу параметрів (натренована з модифікованої довідкової бази даних) [9]. На вхід ШНМ було подано розраховану швидкість поширення ультразвуку за даними зі сертифікатів якості на газ, вміст діоксиду вуглецю та азоту (зі сертифікатів якості на природний газ). На виході ШНМ отримано значення теплоти згоряння газу. В цьому випадку значення фактичної теплоти згоряння природного газу збіглися зі значенням, отриманими за допомогою ШНМ. Коефіцієнт кореляції між фактичними значеннями теплоти згоряння та отриманими за допомогою мережі склав 0,9916, а приведена до діапазону похибка дорівнювала 1,5 %.

В технічних умовах на природний газ для промислового та комунально-побутового споживання немає вимог до допустимої похибки визначення теплоти згоряння природного газу, але наведено відомості щодо збіжності результатів [1, 14]. Теплота згоряння газу, розрахована з послідовності виконаних двох аналізів одного зразка газу одним виконавцем, з використанням одного і того ж методу та приладу, визнається достовірною (з 95%-ною ймовірністю довіри), якщо розбіжність між ними не перевищує 0,1%. Оскільки під час проведення дослідження нового методу витримано останню умову (розбіжність не перевищувала 0,05% у жодному з випадків), то можна стверджувати, що отримані результати апробації розробленого методу на реальних значеннях показників газу (зі сертифікатів якості на природний газ), підтвердили можливість його реалізації.

На етапі розроблення методики експериментального дослідження запропонованого методу визначення теплоти згоряння природного газу було проведено вибір засобів вимірювальної техніки та обладнання для вимірювання швидкості поширення ультразвуку, вмісту діоксиду вуглецю та вмісту азоту. Для прикладу, вимірювання швидкості поширення ультразвуку в газі можна здійснити за допомогою приладу серії FLOWSIC 100 компанії SICK MAİNAK (Німеччина), або звичайною ультразвуковою технікою, зафіксувавши відстань. Такі вимірювання можливо здійснювати, розробивши герметичну камеру, в яку б подавався газ після або перед вимірюванням вмісту CO<sub>2</sub>. Як вторинний прилад в такому разі можна використати серійний дефектоскоп типу УД2-70. Очікувана точність вимірювань (до 0.05 м/с) буде цілком задовільною і відповідатиме умовам моделювання. Для вимірювання вмісту діоксиду вуглецю існує ряд переносних газоаналізаторів серії АНКAT-310 ТД „Автоматика” (Росія). З вибо-

Таблиця 1 – Результати визначення теплоти згоряння газу

Сертифікат	1	2	3	4	5	6	7	8
Теплота згоряння газу зі сертифікатів якості, ккал/м <sup>3</sup>	8540,0	8830,0	9390,0	8760,0	8820,0	8910,0	8910,0	8900,0
Теплота згоряння, отримана за допомогою ШНМ (з врахуванням N <sub>2</sub> ), ккал/м <sup>3</sup>	8592,1	8812,3	9393,4	8708,6	8797,5	8923,7	8919,5	8913,2
Теплота згоряння, отримана за допомогою ШНМ (без врахування N <sub>2</sub> ), ккал/м <sup>3</sup>	8919,4	8814,0	9420,4	8891,5	8816,4	8915,5	8912,2	8907,9

ром апаратури для визначення вмісту азоту виникли труднощі, оскільки він є інертним газом і характеризується досить низькою хімічною активністю. Тобто, методів вимірювання вмісту азоту в середовищі природного газу, які б можна було реалізувати в польових умовах, не вдалось знайти. В зв'язку з цим, необхідно було дослідити можливість проведення визначення теплоти згоряння природного газу за умови вилучення з переліку інформативних параметрів вмісту азоту в газі. При цьому основним критерієм дослідження повинно стати досягнення мінімального значення похибки визначення теплоти згоряння природного газу. Тобто для визначення теплоти згоряння пропонується використовувати лише швидкість поширення ультразвуку в газі та вміст діоксиду вуглецю.

**Дослідження нового методу після виключення одного інформативного параметра (вміст азоту)**

Дослідження проведено зі застосуванням різних варіантів штучних нейронних мереж, натренованих на значеннях параметрів із модифікованої бази даних зразків природного газу (всього 95 зразків) [9]. Різниця між мережами полягала в різній кількості шарів та нейронів у них. У попередніх випадках було використано ШНМ з одним прихованим шаром, а кількість нейронів у ньому не перевищувала 12. Для перевіряння методу визначення теплоти згоряння без вмісту азоту було використано ШНМ з двома прихованими шарами, кількість нейронів у яких складала 16 і 4 відповідно. На вхід мережі було подано швидкість ультразвуку в газі та вміст діоксиду вуглецю, а на виході отримано значення теплоти згоряння природного газу. Приведена до діапазону похибка складала 3,7%. Аналогічно за допомогою цієї ШНМ були перевірені на реальних значеннях параметрів газу (зі сертифікатів якості на природний газ, які отримано на одному з підприємств Івано-Франківської області). Приведена до діапазону похибка в цьому випадку складала 5,56%. Результати визначення теплоти згоряння наведено в таблиці 1.

Отже, 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. Надалі заплановано провести роботи щодо експериментального перевіряння запропонованого методу.

**Література**

1 Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения: ГОСТ 5542-87.-[Введен 1988-01-01]. – М: Государственный комитет СССР по стандартам, 1982. – 6 с.  
 2 Карпаш О.М. Проблемні питання оцінки якості природного газу / О.М. Карпаш, І.Я. Дарвай // Нафтогазова енергетика. – 2007. – №2(3). – С.46-52.  
 3 Газы горючие природные. Хроматографический метод определения компонентного состава: ГОСТ 23781-87.-[Введен 1988-01-01]. – М: Государственный комитет СССР по стандартам, 1982. – 12 с.  
 4 Газы горючие природные. Расчетный метод определения теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе: ГОСТ 22667-82. – [Введен 1983-07-01]. – М: Государственный комитет СССР по стандартам, 1982. – 6 с.  
 5 Газы горючие природные. Метод определения теплоты сгорания водяным калориметром: ГОСТ 27193-86.-[Введен 1988-01-01]. - М: Государственный комитет СССР по стандартам, 1987. – 14 с.  
 6 Дарвай І.Я. Проблемні питання визначення якості природного газу в Україні // [Техніка і прогресивні технології у нафтогазовій інженерії]: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, Івано-Франківськ, 16-20 вересня 2008 р.; ІФНТУНГ. – Івано-Франківськ: Факел, 2008. – 240 с.

7 Карпаш О.М. Нові інформативні параметри для визначення теплоти згоряння природного газу / О.М. Карпаш, І.Я. Дарвай, М.О. Карпаш // Нафтова і газова промисловість. – 2008. – №4. – С.57-60.

8 Карпаш О.М. Теоретичне підґрунтя методу експрес-контролю теплоти згоряння природного газу / О.М. Карпаш, І.Я. Дарвай [Незруйнівний контроль та технічна діагностика]: матеріали 6-тої Національної науково-технічної конференції і виставки. 9-12 червня 2009 р. – К., 2009. – 221 с.

9 Morrow T.B. Development of a low cost inferential natural gas energy flow rate prototype retrofit module, Final report, DOE Cooperative Agreement No. DE-FC21-96MC33033, U.S. Department of Energy, Morgantown, WV. Southwest Research Institute, San Antonio, TX.

10 Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С.Хайкин. – М.: Вильямс, 2006. – 1105 с.

11 Осовский С. Нейронные сети для обработки информации: Пер. с польского И.Д. Рудинского / С.Осовский. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 344 с.

12 Дарвай І.Я. Теоретичне обґрунтування методу визначення теплоти згоряння природного газу / І.Я. Дарвай [Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи]: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції та виставки, 20-23 жовтня 2009 р. – Івано-Франківськ: Факел, 2009. – 125 с.

13 Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки: ГОСТ 30319.1-96. – [Введен 2000-01-01]. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2000. – 16 с.

14 Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости: ГОСТ 30319.2-96. – [Введен 2000-01-01]. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2000. – 55 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії*

*10.04.10*

*Рекомендована до друку професором*

*І. С. Кісілем*