

## Теоретичне обґрунтування нового методу визначення теплоти згоряння природного газу

*Дарвай І.Я., Карпаш О.М., Карпаш М.О.*

*Івано-Франківський національний університет нафти і газу*

Рассмотрено теоретическое обоснование нового метода определения теплоты сгорания природного газа, который состоит в комплексном измерении таких параметров, как скорость распространения звука в газе, содержание диоксида углерода и азота. Разработанный метод проверен с помощью искусственной нейронной сети на справочных значениях параметров природного газа и смоделирован с помощью этой сети на реальных значениях параметров газа. Результаты моделирования подтвердили осуществимость реализации метода.

**Ключевые слова:** природный газ, определение теплоты сгорания.

Розглянуто теоретичне обґрунтування нового методу визначення теплоти згоряння природного газу, який полягає у комплексному вимірюванні таких параметрів, як швидкість поширення звуку в газі, вміст діоксиду вуглецю та азоту. Розроблений метод перевірено за допомогою штучної нейронної мережі на довідкових значеннях параметрів природного газу та змодельовано за допомогою цієї мережі на реальних значеннях параметрів газу. Результати моделювання підтвердили спроможність реалізації методу.

**Ключові слова:** природний газ, визначення теплоти згоряння.

Україна власними первинними енергетичними ресурсами забезпечена недостатньо [1]. Тому актуальною є економія природного газу, яка нерозривно пов'язана не лише з його кількістю, але й з якістю.

На якість природного газу як основного енергоресурсу нашої держави впливає багато чинників, у тому числі вміст вуглеводнів, інертних газів, вологи тощо. Теплоту згоряння природного газу можна назвати основним показником якості газу, оскільки вона є показником призначення, тому що визначає енергетичну цінність газу. Тим більше, що транзит обсягів газу, який пройшов через кордон України (за умовами договору), здійснюється з врахуванням його калорійності.

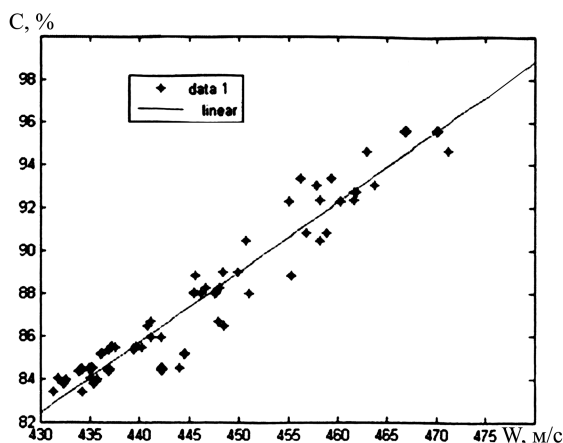
Визначення основного показника якості природного газу — теплоти згоряння — в нашій державі проводять за двома методами: розрахунковим (за компонентним складом природного газу, який визначають хроматографічним методом) та експериментальним (визначення теплоти згоряння водяним калориметром) [2–4]. У роботі [5] проаналізовано переваги та недоліки кожного з методів, вказано на необхідність розроблення нового експрес-методу визначення теплоти згоряння природного газу, який одночасно дозволяв би вимірювати цей показник без визначення повного компонентного складу газу, був порівняно недоро-

гим, точним та дозволяв проводити вимірювання в режимі реального часу.

Важливим питанням також є система розрахунку за спожитий газ. Якщо майже в усіх країнах світу постачальник зі споживачем природного газу здійснює технічний розрахунок енергоємності  $E$  (обчислюється як добуток об'єму газу  $V$  та нижчої теплоти згоряння  $Q_H$ ), тобто проводить коригування вартості природного газу в залежності від його якості, то в Україні розрахунок споживачів за природний газ здійснюється за обсягами переданого газу без урахування його теплоти згоряння.

Метою роботи є теоретичне обґрунтування нового методу визначення теплоти згоряння природного газу за допомогою отриманих із сертифікатів якості на природний газ реальних параметрів.

У результаті виконаних теоретичних досліджень було запропоновано новий метод визначення теплоти згоряння газу, який полягає у нелінійній багатопараметровій апроксимації теплоти згоряння як функції від швидкості поширення звуку в газі, від вмісту азоту та діоксиду вуглецю [5]. З метою вибору параметрів для визначення теплоти згоряння було проведено кореляційний аналіз стандартизованих фізико-хімічних показників газу: компонентного складу газу (вмісту горючих компонентів (вуглеводнів) та негорючих (діоксиду вуглецю, азо-



Залежність вмісту метану від швидкості поширення звуку в природному газі.

ту)), швидкості поширення звуку в газі, густини, молярної маси тощо [6].

Результати кореляційного аналізу показали, що найвище значення мали коефіцієнти кореляції між швидкістю ультразвуку та вуглеводневим вмістом газу та його густиною. Коефіцієнти кореляції  $K$  в цьому випадку склали: швидкість ультразвуку – метан – 0,97; швидкість звуку – етан – 0,90; швидкість звуку – пропан – 0,80; швидкість звуку – бутан – 0,86; швидкість звуку – густина – (-0,99).

На рисунку зображено залежність швидкості поширення звуку в газі від вмісту метану, який є основним компонентом природного газу; вміст його в газі перебуває в межах від 85 до 95 % (об.).

Коефіцієнти кореляції між теплою згоряння та вуглеводнями склали: для метану  $K = -0,58$ ; для етану  $K = 0,86$ ; для пропану  $K = 0,92$ . Оскільки ці значення коефіцієнтів є дещо нижчими у порівнянні зі швидкістю поширення звуку, то теплоту згоряння доцільніше визначати через цей параметр. Визначати густину недоцільно, оскільки між нею та швидкістю поширення звуку існує фізичний зв'язок, який буде описано нижче. Але при цьому слід врахувати також вміст діоксиду вуглецю та азоту у при-

родному газі, які, як показали результати кореляційного аналізу, також здійснюють вплив на значення теплоти згоряння. Коефіцієнти кореляції між теплою згоряння та азотом і діоксидом вуглецю були однаковими ( $K = -0,37$ ). Діоксид вуглецю та азот не виділяють тепла при спалюванні, але можуть сприяти неповному згорянню інших компонентів природного газу [6].

Отже, описані вище результати кореляційного аналізу вказали на те, що теплота згоряння газу є функцією комплексу таких параметрів, як швидкість поширення звуку в газі, вміст азоту та діоксиду вуглецю. Тому для визначення цієї характеристики за значеннями згаданих вище параметрів необхідно було вирішити задачу нелінійної апроксимації функції кількох параметрів. Для цього можна застосувати алгоритм нейронних мереж [7].

Для перевірки запропонованого методу було проведено моделювання процесу визначення теплоти згоряння природного газу за допомогою алгоритму штучної нейронної мережі (ШНМ). Як тренувальний обрано алгоритм зворотного поширення помилки Левенберга – Марквардта, який рекомендують для випадків, коли мережа та кількість навчальних пар у множині є невеликими.

При застосуванні ШНМ було використано базу довідкових даних, що складалася з 95 зразків сумішей природного газу [8]. Ця база є модифікованою множиною сумішей природного газу, значення показників якої отримано хроматографічним методом. Вихідним параметром для ШНМ була теплота згоряння природного газу, а вхідними параметрами були швидкість поширення ультразвуку в газі, вміст азоту та вміст діоксиду вуглецю. Для створення ШНМ базу даних поділено на три частини: для тренування обрано 78 варіацій якісних показників газу, для тестування – 8 (які не входили до 78), для моделювання – 9 (які не входили до жодного з попередніх наборів).

Теплота згоряння природного газу, яку отримано в результаті моделювання роботи

**Таблиця 1. Основні показники природного газу із сертифікатів якості 1–8**

Показник	1	2	3	4	5	6	7	8
Вміст діоксиду вуглецю, % (об.)	0,017	0,057	0,627	0,072	0,042	0,064	0,063	0,062
Вміст азоту, % (об.)	3,514	0,512	0,702	1,661	0,666	0,759	0,759	0,762
Густина газу, кг/м <sup>3</sup>	0,6878	0,6731	0,7363	0,6815	0,6737	0,6833	0,6830	0,6826

**Таблиця 2. Порівняння фактичних значень теплоти згоряння газу з отриманими за допомогою ШНМ**

Теплота згоряння газу	1	2	3	4	5	6	7	8
Вища зі сертифікатів якості, ккал/м <sup>3</sup>	8540,0	8830,0	9390,0	8760,0	8820,0	8910,0	8910,0	8900,0
Отримана за допомогою ШНМ, ккал/м <sup>3</sup>	8592,1	8812,3	9393,4	8708,6	8797,5	8923,7	8919,5	8913,2

ШНМ, відповідає фактичним значенням теплоти згоряння газу, які отримані хроматографічним методом. Приведена до діапазону похибка визначення теплоти згоряння за допомогою довідкових даних склала 2,4 %.

Для дослідження запропонованого методу на реальних даних використано 8 сертифікатів якості природного газу, які отримано на одному з підприємств Івано-Франківської обл. У табл.1 наведено основні показники з цих сертифікатів, значення параметрів газу в яких отримані хроматографічним методом.

Швидкість звуку в природному газі в Україні не регламентується вимогами нормативних документів, тому для його обчислення використано ГОСТ [9, 10]. Розрахунки проведено з використанням програми MATLAB 7.0.

Швидкість звуку залежить від параметрів стану газу (температури та тиску), а оскільки у нашому випадку суміш, то ще й від складу. Згідно з ГОСТ 30319.1-96, швидкість звуку визначають за формулою

$$u = 18,591 (T k K / \rho_c)^{1/2}, \quad (1)$$

де  $T$  — температура природного газу;  $k$  — показник адиабати;  $K$  — коефіцієнт стискуваності;  $\rho_c$  — густина природного газу за стандартних умов.

Показник адиабати природного газу розраховано за формулою Кобза [9].

Для розрахунку коефіцієнта стискуваності було використано модифіковане рівняння стану GERG-91, в якому враховують такі параметри, як густина газу, температура, тиск, а також вміст діоксиду вуглецю та азоту [10].

Розраховано за формулою (1) значення швидкості поширення звуку в природному газі у залежності від сертифікату якості, м/с: 1 — 438,5261; 2 — 442,8236; 3 — 421,3084; 4 — 440,1655; 5 — 442,6557; 6 — 439,2279; 7 — 439,3349; 8 — 439,4786.

На вхід ШНМ, яка використовувалася для перевірки результатів кореляційного аналізу та була натренована на значеннях з довідкової бази даних [5], було подано розраховану швидкість звуку за даними зі сертифікатів якості на газ, вміст діоксиду вуглецю та азоту (також зі сертифікатів якості на природний газ). На виході ШНМ було значення вищої теплоти згоряння газу. Результати моделювання за допомогою ШНМ наведено в табл.2. Як бачимо, значення фактичної теплоти згоряння природного газу відповідають значенням, отриманими

за допомогою ШНМ. Коефіцієнт кореляції складає 0,9916, приведена до діапазону похибка дорівнює 1,5 %.

Отже, отримані результати моделювання розробленого методу на реальних значеннях показників газу (зі сертифікатів якості на природний газ) підтвердили результати кореляційного аналізу та моделювання ШНМ за довідковими значеннями. Це дало змогу зробити висновок про адекватність запропонованого методу раніше встановленим вимогам. Тобто теплоту згоряння природного газу з достатньою точністю можна отримати шляхом визначення швидкості поширення звуку в природному газі та вмісту шкідливих компонентів (азоту та діоксиду вуглецю).

### Список літератури

1. Карпаш О.М., Дарвай І.Я. Проблемні питання оцінки якості природного газу // Нафтогазова енергетика. — 2007. — № 2. — С. 46–52.
2. ГОСТ 23781-87. Газы горючие природные. Хроматографический метод определения компонентного состава.
3. ГОСТ 22667-82. Газы горючие природные. Расчетный метод определения теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе.
4. ГОСТ 27193-86. Газы горючие природные. Метод определения теплоты сгорания водяным калориметром.
5. Карпаш О.М., Дарвай І.Я., Карпаш М.О. Нові інформативні параметри для визначення теплоти згоряння природного газу // Нафтова і газова промисловість. — 2008. — № 4. — С. 57–60.
6. Карпаш О.М., Дарвай І.Я. Теоретичне підґрунтя методу експрес-контролю теплоти згоряння природного газу // Неруйнівний контроль та технічна діагностика : Матеріали VI Нац. наук.-техн. конф. і виставки, Київ, 9–12 черв. 2009 р. — Київ, 2009. — С. 306.
7. Хайкин С. Нейронные сети : Полный курс. — М. : Вильямс, 2006. — 1105 с.
8. Morgow T.B., Kelner E., Minachi A. (2000). 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.
9. ГОСТ 30319.1-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки.
10. ГОСТ 30319.2-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости.

Надійшла до редакції 03.11.09

## The Theoretical Substantiation of a New Method of Natural Gas Combustion Heat Determination

*Darvay I. Ya., Karpash O. M., Karpash M. O.*

*National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankovsk*

The theoretical substantiation of a new method of natural gas combustion heat determination is considered. The method consists in complex measurement of the parameters such as sound propagation velocity in gas and carbon dioxide and nitrogen dioxide content. The method verification by artificial neural network with natural gas reference parameters application and simulation by the network with natural gas parameters real data application is conducted. The method implementation feasibility by the simulation results is confirmed.

**Key words:** natural gas, combustion heat determination.

Received November 3, 2009

---

---

### «Сводный каталог периодических изданий, выпускаемых академиями наук — членами МААН»

Новый каталог создан после принятия Советом Международной ассоциации академий наук решения про поддержку инициативы Совета по книгоизданию при МААН о создании совместного подписного каталога научных периодических изданий Академий наук и организаций — членов МААН.

Понимая важное значение создания «Сводного каталога», подписное агентство «Укринформнаука» ставит перед собой задачу ознакомить ученых и специалистов, аспирантов и студентов с деятельностью организаций и лабораторий, функционирующих в академических учреждениях на постсоветском пространстве, облегчить поиск и заказ академических журналов и трудов ученых научных организаций академий наук — членов МААН. Целью создания каталога является улучшение коммуникаций и обмена научной информацией между учеными и создание льготных условий для подписчиков, издателей и редакций научных изданий.

В «Сводном каталоге» изложены условия подписки на периодические и книжные издания на 2010 год.

В каталог на второе полугодие 2010 года вошли периодические издания Национальных академий наук Армении, Республики Беларусь, Республики Казахстан, Российской Федерации, Республики Узбекистан, Украины.

По вопросам организации подписки, оформления заказов и обработки подписной документации обращайтесь

#### **В Украине**

**Подписное агентство «Укринформнаука»**

ул. Владимирская, 54, комн. 144

Киев-30, 01601

тел. / факс +38 (044) 239-64-57

моб. +38 (050) 154-77-83

E-mail: innovation@nas.gov.ua

#### **В России**

**Компания «Информнаука»**

вед. специалист

Перова Ольга Александровна

тел.: 8(495) 787 38 73

факс: 8(499) 152 54 81

e-mail: perova@viniti.ru