

Ленковський Т. М. Вплив водню на міцність матеріалів за різних макромеханізмів поширення тріщини // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів: В 2-х т./ Львів: ФМІ НАНУ. – 2010. – Т.1. – С. 106 – 110. 13. Микитин Г.В. Методологічні засади для інформаційної технології відбору даних про напружено-деформований стан конструкційних матеріалів // Вимірювальна техніка і метрологія. – № 71. – 2010. – С. 45-51 14. ДСТУ 2865-94. Контроль неруйнівний. Терміни та визначення. 15. ГОСТ 8.010-99. ГСИ. Методика выполнения измерений. Основные положения. 16. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. 17. ГОСТ 25. 506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. 18. Р 50-54-45-88. Расчеты и испытания на прочность. Экспериментальные методы определения напряженно-деформированного

состояния элементов машин и конструкций. Метод натурной тензометрии энергетического оборудования. 19. ДСТУ 4675: 2006. Розрахунки і випробування на міцність. Методика визначення характеристик динамічної тріщиностійкості металів за нормального відриву за температури від мінус 196° С до 400° С. 20. Іваницький Я. В., Штаюра С. Т., Микитин Г. В., Дмитрів З. В. Метрологічне забезпечення вимірювання параметрів напружено-деформованого стану матеріалів тензометричним методом // Матеріали 15-ї Міжнародної конференції “Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів”. – Славське, 15–20 лютого 2010. – С. 93 – 94. 21. Микитин Г. В. Основи метрології: навч. посібник. – Львів: СПОЛОМ, 2008. – 296 с. 22. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition. – ISO, Switzerland, 1993 (GUM). 23. ДСТУ-Н РМГ 43-2006. Метрологія. Застосування “Настанови з оцінювання невизначеності у вимірюваннях”.

УДК 536.66:53.058

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОТВОРНОЇ ЗДАТНОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Ї Мотало Андрій¹, Мотало Василь², 2011

¹ ГПУ “Львівгазвидобування”, вул. Рубчака, 27, Львів, 79026, Україна,

² Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра інформаційно-вимірювальних технологій, вул. С.Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

Розглянуті чинні у сучасній газометрії методи вимірювання питомої теплоти згорання (теплотворної здатності) природного газу. Запропоновано і проаналізовано методика оцінювання точності вимірювання питомої теплоти згорання природного газу калориметричним методом за допомогою визначення непевності отриманих результатів вимірювань.

Рассмотрены действующие у современной газометрии методы измерения удельной теплоты сгорания (теплотворной способности) природного газа. Предложена и исследована методика оценивания точности измерения удельной теплоты сгорания природного газа калориметрическим методом путем расчета неопределенности полученных результатов измерений.

The methods of natural gas specific calorific value (calorific power) measurements which are valid in the up-to-date gasometry are considered. The methodology of evaluation of precision of natural gas specific calorific value measurements by a calorimetric method is proposed and analyzed. The methodology is based on determining of uncertainty of received results of measurements.

Вступ. Найбільшою сферою використання природного газу (ПГ) сьогодні є промислове та комунально-побутове господарство, в яких газ використовується як паливо. Найважливішою якісною характеристикою

газу в цьому випадку є кількість тепла, що виділяється під час згорання певного об'єму газу [1].

Основним показником якості ПГ, який визначає його енергетичну цінність, є *питома об'ємна теплота*

згоряння або *теплотворна здатність* газу H , МДж/м³. Її знаходять як кількість тепла, що виділяється під час повного згоряння газу в повітрі за сталого тиску p_{32} і сталої температури T_{32} , віднесеного до об'єму сухого газу, визначеного за стандартних умов, тобто за тиску $p_c = 0,101325$ МПа і температури $T_c = 293,15$ К [2]. Повне згоряння газу, як і будь-якого іншого палива, спостерігається тоді, коли в газових продуктах горіння немає горючих газових компонентів або компонентів неповного окиснення.

У газовому аналізі розрізняють нижчу та вищу питому об'ємну теплоту згоряння газу. *Нижчу питому об'ємну теплоту згоряння* H_H , МДж/м³ визначають за наявності водяної пари у продуктах згоряння газу при температурі T_{32} , а *вищу об'ємну питому теплоту згоряння* H_B , МДж/м³ – після повної конденсації водяної пари, яка міститься у продуктах згоряння газу при температурі T_{32} .

Цей показник якості є особливо важливим для комунально-побутової сфери споживання природного газу. Зокрема, оцінюючи ПГ як енергоносіє, визначають таку його характеристику, як *вміст енергії* E , що знаходять як добуток об'єму газу V , м³ на його нижчу питому об'ємну теплоту згоряння H_H , МДж/м³, тобто $E = VH_H$, МДж, і використовують у розвинених зарубіжних країнах для встановлення вартості спожитого газу [3]. Актуальними сьогодні є перспективи переходу газової галузі України на облік природного газу за енергетичною цінністю [4].

Отже, точність вимірювання теплоти згоряння ПГ безпосередньо впливає на точність оцінювання його енергетичної цінності і, відповідно, на його вартість. Вказані чинники і зумовили тематику дослідження цієї статті – аналіз точності вимірювання питомої теплоти згоряння (теплотворної здатності) природного газу.

1. Аналіз чинних методів вимірювання питомої теплоти згоряння природного газу. Вимірювання *питомої теплоти згоряння* ПГ у хіміко-аналітичних лабораторіях підприємств НАК “Нафтогаз України” здійснюють *прямим калориметричним методом* згідно із чинним сьогодні ГОСТ 27193-86 [5] та *опосередкованим розрахунковим методом* згідно із ГОСТ 22667-82 [6].

Калориметричний метод реалізується за допомогою газового водяного калориметра неперервної дії, у якому досліджують газові суміші, які у процесі дослідження не змінюють свого компонентного складу

та фізико-хімічних властивостей, зокрема вологості та наявності негорючих компонентів. Отже, одержані результати вимірювання відображають реальну теплоту згоряння газу.

Розрахунковий метод ґрунтується на попередньому визначенні компонентного складу газу хроматографічним методом згідно із вимогами ДСТУ ISO 6974-2:2007 [7] й обчисленням вищої H_B та нижчої H_H питомої теплоти згоряння ПГ за формулами:

$$H_B = \sum_{i=1}^k H_{Bi} \cdot C_i \quad \text{та} \quad H_H = \sum_{i=1}^k H_{Hi} \cdot C_i, \quad (1)$$

де H_{Bi} , H_{Hi} – відповідно вища та нижча питома об'ємна теплота згоряння *i-го* компонента газу, визначені теоретичними розрахунками і наведені у ГОСТ 22667-83 [5], МДж/м³; C_i – концентрація *i-го* компонента газу в газовій суміші; k – кількість компонентів газової суміші.

Теоретичний метод визначення теплоти згоряння газу простіший у реалізації порівняно із калориметричним, оскільки у ньому використовують результати хроматографічного дослідження компонентного складу газу, які є обов'язковими для газовидобувних підприємств. Однак зазначимо, що отримані результати вимірювання завищені порівняно із результатами калориметричного методу і не відображають реальної теплотворної здатності досліджуваного газу, оскільки не враховується його вологість та наявність у добутому газі негорючих компонентів, зокрема вуглекислого газу, азоту, гелію тощо, і можуть бути об'єктивною оцінкою теплотворної здатності лише для осушеного та очищеного газу.

Перевагою *калориметричного методу*, незважаючи на складність визначення теплоти згоряння газу, є об'єктивність отриманих результатів, оскільки враховується вологість газу та наявність у добутому газі негорючих компонентів, тому його можна використовувати для неперервного моніторингу енергетичної цінності добутого газу у реальному масштабі часу.

Отже, як впливає із виконаного аналізу, калориметричний метод вимірювання теплоти згоряння ПГ дає об'єктивніші результати вимірювання, ніж теоретичний, і є перспективнішим у сучасній газометрії. Тому предметом дослідження цієї статті є аналіз точності вимірювання теплоти згоряння (теплотворної здатності) ПГ калориметричним методом.

2. Основні завдання досліджень і формулювання цілі статті. У питанні аналізу точності вимірювання питомої теплоти згоряння (теплотворної

здатності) ПГ калориметричним методом є проблеми, зумовлені, насамперед, недосконалістю чинного ГОСТ 27193-86 [5] щодо регламентації вимог до точності вимірювань і подання результатів вимірювань питомої теплоти згорання газу.

Зокрема, згідно з ГОСТ 27193-86 [5] за результат вимірювання питомої теплоти згорання приймають середнє арифметичне результатів трьох незалежних експериментів, допустиме відхилення яких від середнього значення не повинне перевищувати $\pm 0,25$ МДж/м³, якщо отримане середнє значення не більше від 25 МДж/м³, і не перевищувати $\pm 1\%$, якщо середнє значення більше за 25 МДж/м³ [5, табл. 5].

Отже, у цьому випадку йдеться лише про розсіювання отриманих результатів окремих експериментів навколо середнього значення, зумовлене випадковими впливними чинниками, і не враховується вплив на результат вимірювання систематичних впливних чинників, які зумовлені непевністю результатів вимірювання величин, за якими обчислюють значення питомої теплоти згорання газу, і вплив яких може істотно перевищувати вплив на результат вимірювання випадкових чинників. Тобто одержане середнє значення питомої теплоти згорання може суттєво відрізнятись від істинного значення [8].

Отже, у ГОСТ 27193-86 [5] не передбачено можливості оцінювати точність отриманих значень питомої теплоти згорання і запису результату вимірювання із вказуванням характеристик його точності (похибок або невизначеності результатів вимірювань), як вимагає Закон України про метрологію та метрологічну діяльність [9], тобто не виконуються умови забезпечення єдності вимірювань. Також це унеможливує порівняння результатів досліджень ПГ, здійснених у різних хіміко-аналітичних лабораторіях згідно із вимогами ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 [10].

Метою статті є розроблення методики оцінювання точності вимірювання питомої теплоти згорання (теплотворної здатності) ПГ калориметричним методом і забезпечення виконання умови єдності вимірювань.

Основні завдання досліджень для досягнення цієї мети такі:

- аналіз методики вимірювання питомої теплоти згорання (теплотворної здатності) ПГ калориметричним методом;
- розроблення методики знаходження оцінок непевності результатів вимірювання питомої теплоти згорання (теплотворної здатності) ПГ калориметричним методом;

- експериментальне дослідження проб ПГ для визначення його питомої теплоти згорання (теплотворної здатності) та оцінювання точності отриманих результатів вимірювань.

3. Аналіз методики вимірювання питомої теплоти згорання природного газу калориметричним методом

3.1. Основні вимірювальні вузли калориметричної устави. Для аналізу точності вимірювання питомої теплоти згорання (теплотворної здатності) ПГ калориметричним методом насамперед необхідно знайти функцію перетворення калориметра. Для цього проаналізуємо методику вимірювання теплоти згорання ПГ калориметричним методом згідно із ГОСТ 27193-86 [5].

Калориметричний або експериментальний метод визначення теплоти згорання природного газу полягає у вимірюванні за допомогою газового водяного калориметра неперервної дії кількості тепла, що виділяється під час спалювання певного об'єму газу, та вимірюванні маси конденсату водяної пари, що утворюється під час повного згорання газу, на основі яких обчислюють вищу H_V та нижчу H_N об'ємну теплоту згорання досліджуваного газу, МДж/м³.

Основними вимірювальними вузлами калориметричної устави є:

- газовий водяний калориметр зі всіма вузлами відповідно до ГОСТ 27193-86 [5];
- барометр aneroid або ртутний;
- термометр з ціною поділки 0,5 °С;
- секундомір з ціною поділки 0,1 с або 0,2 с;
- терези коромислові та настільні з границями вимірювання 5 або 10 кг із комплектами каліброваних гир.

3.2. Аналіз вимірювального процесу. Визначаючи теплоту згорання ПГ калориметричним методом, здійснюють такі операції:

- у теплообмінник водяного калориметра подають потік води зі сталою масовою витратою (кг/хв) і вимірюють масу m_e відібраної води (г);
- у водяний калориметр подають досліджуваний газ, об'єм якого ($V_{об}$, м³) вимірюють газовим лічильником, і спалюють;
 - вимірюють масу конденсату водяної пари (m_k , г), яка утворюється під час згорання газу, об'єм якого ($V_{зк}$, м³) вимірюють газовим лічильником;
 - додатково вимірюють значення параметрів, які характеризують калориметричний процес і наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Додаткові параметри калориметричного процесу

№ з/п	Параметр	Позначення	Границі похибок вимірювання
1	Атмосферний тиск повітря за показом барометра, кПа	P_0	$DP_0 = \pm 15$, Па
2	Температура за показом термометра на барометрі, °С	Q_0	$DQ_0 = \pm 0,5$, °С
3	Тиск газу в газовому лічильнику, кПа	P_z	$DP_z = \pm 10$, Па
4	Температура газу в газовому лічильнику, °С	Q_z	$DQ_z = \pm 0,5$, °С
5	Маса вимірювального циліндра для конденсату водяної пари, г	$m_{\text{ц}}$	$Dm_{\text{ц}} = \pm 0,5$, г
6	Маса посудини для збирання конденсованої води, г	m_n	$Dm_n = \pm 1,0$, г

3.3. Вимірювання вищої питомої об'ємної теплоти згорання досліджуваного газу. Вищу питому об'ємну теплоту згорання досліджуваного газу H_B (МДж/м³) за стандартних умов, тобто за температури $T_c = 293,15$ К і тиску $p_c = 0,101325$ МПа, визначають за формулою:

$$H_B = \frac{c_v m_v DQ_v f_{kv}}{V_{zv} f_{zl} K}, \text{ МДж/м}^3, \quad (2)$$

де $c_v = 4,187 \cdot 10^{-6}$, МДж/(г·°С) – питома теплоємність води; m_v – маса потоку води, відібраної в калориметрі, г; DQ_v – середня різниця температур води на виході та вході калориметра, °С; V_{zv} – об'єм газу, який згорає в калориметрі під час відбору води, вимірний газовим лічильником, м³; f_{kv} – коефіцієнт поправки до показів калориметра для вищої питомої об'ємної теплоти згорання, що визначають під час калібрування калориметра; f_{zl} – коефіцієнт поправки до показів газового лічильника, який знаходять під час дослідження газового лічильника з урахуванням похибки його показів D_{zl} за такими формулами:

$$f_{zl} = 1 + 0,01 D_{zl}; \quad (3)$$

– якщо похибка показів газового лічильника D_{zl} від'ємна;

$$f_{zl} = 1 - 0,01 D_{zl}; \quad (4)$$

– якщо похибка показів газового лічильника D_{zl} додатна.

K – коефіцієнт приведення об'єму спалюваного газу до стандартних умов, значення якого обчислюють за формулою:

$$K = \frac{293 \cdot (P_0 + P_z - P_v)}{(273 + Q_z) \cdot 101,325}, \quad (5)$$

де Q_z – температура газу в газовому лічильнику, °С; P_z – тиск газу в газовому лічильнику, кПа; P_v – парціальний тиск водяної пари у насиченому стані за температури газу в газовому лічильнику Q_v , кПа; P_0 –

барометричний тиск повітря під час експерименту (кПа), значення якого знаходять за показом барометра із урахуванням поправок на температуру та висоту:

$$P_0 = P_{0,n} - DP_Q \pm DP_h, \quad (6)$$

де $P_{0,n}$ – показ барометра, кПа; DP_Q – поправка до показу барометра залежно від температури Q_0 його розміщення, кПа; DP_h – поправка до показу барометра залежно від різниці висот розміщення барометра та калориметра, кПа.

Поправку DP_h враховують, якщо різниця висот розміщення барометра та калориметра більша від 10 м. Значення поправки додають, якщо барометр розміщений вище від калориметра, і віднімають – якщо нижче.

3.4. Вимірювання нижчої питомої об'ємної теплоти згорання досліджуваного газу. Для визначення нижчої теплоти згорання досліджуваного газу H_H (МДж/м³) вимірюють масу конденсату водяної пари, яка утворюється під час згорання газу, а значення H_H (МДж/м³) за стандартних умов знаходять за формулою:

$$H_H = \left(\frac{H_B}{f_{kv}} - \frac{c_k m_k DQ_k}{V_{zk} f_{zl} K} \right) f_{kh}, \text{ МДж/м}^3, \quad (7)$$

де $c_k = 2,454 \cdot 10^{-3}$, МДж/(г·°С) – питома теплота конденсації водяної пари при температурі $Q_c = 20$ °С і тиску $p_c = 0,101325$ МПа; m_k – маса зібраного конденсату водяної пари, г; DQ_k – середня різниця температур води на виході та вході калориметра, °С; V_{zk} – об'єм газу, який згорає в калориметрі під час збирання конденсату, вимірний газовим лічильником, м³; f_{kh} – коефіцієнт поправки до показів калориметра для нижчої питомої об'ємної теплоти згорання, який визначають під час калібрування калориметра.

3.5. Визначення результатів вимірювання вищої та нижчої питомої об'ємної теплоти згорання

досліджуваного газу. Згідно із ГОСТ 27193-86 [5] експеримент щодо вимірювання вищої H_B та нижчої H_H питомої об'ємної теплоти згоряння ПГ виконують для n проб досліджуваного газу, а результати вимірювань H_B та H_H визначають як середнє арифметичне результатів із серії n експериментів $H_{B,i}$ та $H_{H,i}$, $i=1,2,\dots,n$ (згідно із ГОСТ 27193-86 [5] $n=3$, хоч, на думку авторів, для отримання достовірних результатів вимірювань потрібно не менше від п'яти проб):

$$H_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_{B,i}, \text{ МДж/м}^3 \text{ та } H_H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_{H,i}, \text{ МДж/м}^3. (8)$$

Результати цих n експериментів $H_{B,i}$ та $H_{H,i}$ заокруглюють до $0,005 \text{ МДж/м}^3$, а одержані за формулою (8) значення вищої H_B та нижчої H_H питомої об'ємної теплоти згоряння досліджуваного газу заокруглюють до $0,05 \text{ МДж/м}^3$.

3.6. Калібрування калориметра. Метою калібрування калориметра є визначення коефіцієнтів поправки $f_{кв}$ та $f_{кн}$ до його показів під час обчислення вищої та нижчої питомої об'ємної теплоти згоряння досліджуваного газу за формулами (2) та (7). Калориметр калібрують за допомогою контрольного газу, яким може бути чистий метан або природний газ відомого складу та із вмістом метану, не меншим за 80 %. Склад калібрувального газу визначають хроматографічним методом згідно із ДСТУ ISO 6974-2:2007 [7].

Значення коефіцієнтів поправки $f_{кв}$ та $f_{кн}$ обчислюють за формулами:

$$f_{кв} = H_{B,p}/H_{B,k} \text{ та } f_{кн} = H_{H,p}/H_{H,k} (9)$$

де $H_{B,p}$ та $H_{H,p}$ – відповідно вища та нижча питома об'ємна теплота згоряння калібрувального газу, знайдені розрахунковим методом згідно з ГОСТ 22667-82 [6], МДж/м^3 ; $H_{B,k}$ та $H_{H,k}$ – відповідно вища та нижча питома об'ємна теплота згоряння калібрувального газу, встановлені експериментально за допомогою калориметра й обчислені за формулами (2) та (7); при цьому прийнято, що коефіцієнти $f_{кв}$ та $f_{кн}$ дорівнюють 1.

Калібрування калориметра здійснюють один раз на рік або під час заміни його компонентів.

4. Методика оцінювання непевності результату вимірювання питомої теплоти згоряння природного газу калориметричним методом

4.1. Встановлення складових непевності результату вимірювання питомої теплоти згоряння природного газу калориметричним методом. Як

видно із наведеного вище аналізу калориметричного процесу, вимірювання вищої H_B та нижчої H_H питомої об'ємної теплоти згоряння ПГ, значення яких обчислюють за формулами (8) із урахуванням результатів (2) та (7), є опосередкованими вимірюваннями із багатократними спостереженнями [8]. Отже, оцінювати непевність результатів вимірювання як вищої H_B , так і нижчої H_H питомої об'ємної теплоти згоряння ПГ потрібно за методикою опрацювання результатів опосередкованих вимірювань у такій послідовності [11]:

- визначити комбіновані стандартні непевності типу В $u_{cB}(H_{B,i})$ та $u_{cB}(H_{H,i})$ результатів вимірювання вищої $H_{B,i}$ та нижчої $H_{H,i}$ питомої об'ємної теплоти згоряння i -ї проби досліджуваного газу згідно із (2) та (7);

- обчислити стандартні непевності типу А $u_A(H_B)$ та $u_A(H_H)$ результатів вимірювання вищої H_B та нижчої H_H питомої об'ємної теплоти згоряння аналізованого газу за (8);

- розрахувати комбіновані стандартні непевності $u_c(H_B)$ та $u_c(H_H)$ результатів вимірювання вищої H_B та нижчої H_H питомої об'ємної теплоти згоряння досліджуваного газу;

- обчислити розширені стандартні непевності $U_p(H_B)$ та $U_p(H_H)$ результатів вимірювання вищої H_B та нижчої H_H питомої об'ємної теплоти згоряння аналізованого газу для заданого рівня довіри p [12].

4.2. Знаходження комбінованої стандартної непевності типу В $u_{cB}(H_{B,i})$ результату вимірювання вищої питомої об'ємної теплоти згоряння i -ї проби досліджуваного газу $H_{B,i}$. Комбінована стандартна непевність типу В $u_{cB}(H_{B,i})$ результату вимірювання вищої питомої об'ємної теплоти згоряння i -ї проби досліджуваного газу $H_{B,i}$ має сім складових, спричинених сімома впливними чинниками – стандартними непевностями результатів вимірювання величин c_e , m_e , $DQ_{e,i}$, V_{2e} , $f_{кв}$, f_{2p} , K , які входять у формулу (2), за якою обчислюють значення $H_{B,i}$:

- $u_B(c_e)$ – стандартна непевність типу В значення питомої теплоємності води c_e , $\text{МДж/(г}\cdot^\circ\text{C)}$;

- $u_B(m_{e,i})$ – стандартна непевність типу В результату вимірювання маси потоку відібраної у калориметрі води $m_{e,i}$ для i -ї проби досліджуваного газу, г;

- $u_B(DQ_{e,i})$ – стандартна непевність типу В результату вимірювання середньої різниці температур води $DQ_{e,i}$ на вході та виході калориметра для i -ї проби досліджуваного газу, $^\circ\text{C}$;

- $u_B(V_{2e,i})$ – стандартна непевність типу В результату вимірювання об'єму i -ї проби дослід-

жуваного газу $V_{z\theta,i}$, який згоряє у калориметрі за час відбирання води масою $m_{\theta,i}$, м^3 .

- $u_B(f_{кв})$ – стандартна непевність типу В значення коефіцієнта поправки $f_{кв}$ до показів калориметра для вищої об'ємної теплоти згоряння газу;

- $u_B(f_{zл})$ – стандартна непевність типу В значення коефіцієнта поправки $f_{zл}$ до показів газового лічильника;

- $u_B(K)$ – стандартна непевність типу В результату визначення коефіцієнта K приведення об'єму спалюваного газу до стандартних умов.

За умови взаємної незалежності розглянутих вище величин комбіновану стандартну непевність типу В $u_{cB}(H_{B,i})$ результату вимірювання вищої питомої об'ємної теплоти згоряння i -ї проби досліджуваного газу $H_{B,i}$ визначаємо як корінь квадратний із зважених на квадрати коефіцієнтів впливу C_j (тут $j = 1, 2, \dots, 7$, оскільки є сім впливних величин, а саме c_{θ} , m_{θ} , DQ_{θ} , $V_{z\theta}$, $f_{кв}$, $f_{zл}$, K) сум квадратів відповідних стандартних непевностей типу В $u_B(x_j)$ результатів вимірювань величин – аргументів x_j , тобто c_{θ} , m_{θ} , DQ_{θ} , $V_{z\theta}$, $f_{кв}$, $f_{zл}$, K [11]:

$$u_{cB}(H_{B,i}) = \sqrt{\sum_{j=1}^7 C_j^2 u_B^2(x_j)} = \sqrt{C_1^2 u_B^2(c_{\theta}) + C_2^2 u_B^2(m_{\theta,i}) + C_{\Delta\Theta_{\theta,i}}^2 u_B^2(\Delta\Theta_{\theta,i}) + C_{V_{z\theta,i}}^2 u_B^2(V_{z\theta,i}) + C_{f_{кв}}^2 u_B^2(f_{кв}) + C_{f_{zл}}^2 u_B^2(f_{zл}) + C_K^2 u_B^2(K)}, \text{ МДж/м}^3, \quad (10)$$

де $C_1 = C_{c_{\theta}}$ – коефіцієнт впливу непевності $u_B(c_{\theta})$, $(\text{г} \cdot \text{C})/\text{м}^3$; $C_2 = C_{m_{\theta,i}}$ – коефіцієнт впливу непевності $u_B(m_{\theta,i})$, $\text{МДж}/(\text{г} \cdot \text{м}^3)$; $C_3 = C_{DQ_{\theta,i}}$ – коефіцієнт впливу непевності $u_B(DQ_{\theta,i})$, $\text{МДж}/(\text{C} \cdot \text{м}^3)$; $C_4 = C_{V_{z\theta,i}}$ – коефіцієнт впливу непевності $u_B(V_{z\theta,i})$, $\text{МДж}/\text{м}^3$; $C_5 = C_{f_{кв}}$ – коефіцієнт впливу непевності $u_B(f_{кв})$, $\text{МДж}/\text{м}^6$; $C_6 = C_{f_{zл}}$ – коефіцієнт впливу непевності $u_B(f_{zл})$, $\text{МДж}/\text{м}^3$; $C_7 = C_K$ – коефіцієнт впливу непевності $u_B(K)$, $\text{МДж}/\text{м}^3$.

Вирази для знаходження коефіцієнтів впливу C_j ($j = 1, 2, \dots, 7$), які наведено у табл. 2, отримані із (2) як частинні похідні результату вимірювання вищої питомої об'ємної теплоти згоряння i -ї проби досліджуваного газу $H_{B,i}$ по кожному аргументу x_j , тобто по c_{θ} , m_{θ} , DQ_{θ} , $V_{z\theta}$, $f_{кв}$, $f_{zл}$, K :

$$C_j = \frac{\partial H_{B,i}}{\partial x_j}, \quad j = 1, 2, \dots, 7. \quad (11)$$

4.3. Знаходження комбінованої стандартної непевності типу В $u_{cB}(H_{B,i})$ результату вимірювання нижчої питомої об'ємної теплоти згоряння i -ї проби досліджуваного газу $H_{B,i}$. Комбінована стандартна непевність типу В $u_{cB}(H_{B,i})$ результату вимірювання нижчої питомої об'ємної теплоти згоряння i -ї проби досліджуваного газу $H_{B,i}$ має дев'ять складових, спричинених дев'ятьма впливними чинниками – стандартними непевностями результатів вимірювання величин H_B , c_{θ} , m_{θ} , DQ_{θ} , $f_{кв}$, $V_{z\theta}$, $f_{кв}$, $f_{zл}$, K , які входять у формулу (7), за якою обчислюють значення $H_{B,i}$:

- $u_B(H_B)$ – стандартна непевність типу В вимірювання вищої питомої об'ємної теплоти згоряння i -ї проби досліджуваного газу $H_{B,i}$, $\text{МДж}/\text{м}^3$;

- $u_B(c_{\theta})$ – стандартна непевність типу В значення питомої теплоти конденсації водяної пари c_{θ} , $\text{МДж}/(\text{г} \cdot \text{C})$;

- $u_B(m_{\theta})$ – стандартна непевність типу В результату вимірювання маси зібраного конденсату водяної пари m_{θ} для i -ї проби досліджуваного газу, г ;

- $u_B(DQ_{\theta,i})$ – стандартна непевність типу В результату вимірювання середньої різниці температур води $DQ_{\theta,i}$ на вході та виході калориметра для i -ї проби досліджуваного газу, C ;

- $u_B(f_{кв})$ – стандартна непевність типу В значення коефіцієнта поправки $f_{кв}$ до показів калориметра для нижчої об'ємної теплоти згоряння газу;

- $u_B(V_{z\theta,i})$ – стандартна непевність типу В результату вимірювання об'єму i -ї проби досліджуваного газу $V_{z\theta,i}$, який згоряє у калориметрі за час збирання конденсату масою m_{θ} , м^3 .

- $u_B(f_{кв})$ – стандартна непевність типу В значення коефіцієнта поправки $f_{кв}$ до показів калориметра для вищої об'ємної теплоти згоряння газу;

- $u_B(f_{zл})$ – стандартна непевність типу В значення коефіцієнта поправки $f_{zл}$ до показів газового лічильника;

- $u_B(K)$ – стандартна непевність типу В результату визначення коефіцієнта K приведення об'єму спалюваного газу до стандартних умов.

Таблиця 2

Коефіцієнти впливу C_j непевностей значень величин $c_\theta, m_\theta, DQ_\theta, V_{2\theta}, f_{к\theta}, f_{2\theta}, K$ на непевність результату вимірювання вищої питомої об'ємної теплоти згоряння i -ї проби досліджуваного газу $H_{B,i}$

$C_1 = C_{c_\theta}, (\text{г}^\circ\text{C})/\text{м}^3$	$C_2 = C_{m_{\theta,i}}, \text{МДж}/(\text{г}\cdot\text{м}^3)$	$C_3 = C_{DQ_{\theta,i}}, \text{МДж}/(\text{г}^\circ\text{C}\cdot\text{м}^3)$	$C_4 = C_{f_{к\theta}}, \text{МДж}/\text{м}^3$
$\frac{m_\theta DQ_\theta f_{к\theta}}{V_{2\theta} f_{2\theta} K}$	$\frac{c_\theta DQ_\theta f_{к\theta}}{V_{2\theta} f_{2\theta} K}$	$\frac{c_\theta m_\theta f_{к\theta}}{V_{2\theta} f_{2\theta} K}$	$\frac{c_\theta m_\theta DQ_\theta}{V_{2\theta} f_{2\theta} K}$
$C_5 = C_{V_{2\theta,i}}, \text{МДж}/\text{м}^6$	$C_6 = C_{f_{2\theta}}, \text{МДж}/\text{м}^3$	$C_7 = C_K, \text{МДж}/\text{м}^3$	
$-\frac{c_\theta m_\theta DQ_\theta f_{к\theta}}{V_{2\theta}^2 f_{2\theta} K}$	$-\frac{c_\theta m_\theta DQ_\theta f_{к\theta}}{V_{2\theta} f_{2\theta}^2 K}$	$-\frac{c_\theta m_\theta DQ_\theta f_{к\theta}}{V_{2\theta} f_{2\theta} K^2}$	

Таблиця 3

Коефіцієнти впливу S_k непевностей значень величин $H_B, c_\kappa, m_\kappa, DQ_\kappa, f_{к\kappa}, V_{2\kappa}, f_{2\kappa}, K$ на непевність результату вимірювання нижчої питомої об'ємної теплоти згоряння i -ї проби досліджуваного газу $H_{H,i}$

$S_1 = S_{H_{B,i}}$	$S_2 = S_{c_\kappa}, (\text{г}^\circ\text{C})/\text{м}^3$	$S_3 = S_{m_{\kappa,i}}, \text{МДж}/(\text{г}\cdot\text{м}^3)$	$S_4 = S_{DQ_{\kappa,i}}, \text{МДж}/(\text{г}^\circ\text{C}\cdot\text{м}^3)$	$S_5 = S_{f_{к\kappa}}, \text{МДж}/\text{м}^3$
$\frac{f_{к\kappa}}{f_{к\theta}}$	$-\frac{m_\kappa DQ_{\theta,i} f_{к\kappa}}{V_{2\kappa} f_{2\kappa} K}$	$-\frac{c_\kappa DQ_{\theta,i} f_{к\kappa}}{V_{2\kappa} f_{2\kappa} K}$	$-\frac{c_\kappa m_\kappa f_{к\kappa}}{V_{2\kappa} f_{2\kappa} K}$	$\frac{H_B}{f_{к\theta}} - \frac{c_\kappa m_\kappa DQ_{\theta,i}}{V_{2\kappa} f_{2\kappa} K}$
$S_6 = S_{V_{2\kappa,i}}, \text{МДж}/\text{м}^6$	$S_7 = S_{f_{к\theta}}, \text{МДж}/\text{м}^3$	$S_8 = S_{f_{2\theta}}, \text{МДж}/\text{м}^3$	$S_9 = S_K, \text{МДж}/\text{м}^3$	
$\frac{c_\kappa m_\kappa DQ_{\theta,i} f_{к\kappa}}{V_{2\kappa}^2 f_{2\kappa} K}$	$-\frac{H_B f_{к\kappa}}{f_{к\theta}^2}$	$\frac{c_\kappa m_\kappa DQ_{\theta,i} f_{к\kappa}}{V_{2\kappa} f_{2\kappa} K}$	$\frac{c_\kappa m_\kappa DQ_{\theta,i} f_{к\kappa}}{V_{2\kappa} f_{2\kappa} K^2}$	

За умови взаємної незалежності розглянутих вище величин комбіновану стандартну непевність типу В $u_{cB}(H_{H,i})$ результату вимірювання нижчої питомої об'ємної теплоти згоряння i -ї проби досліджуваного газу $H_{H,i}$ знаходимо як корінь квадратний зі зважених на квадрати коефіцієнтів впливу S_k (тут $k = 1, 2, \dots, 9$, оскільки є дев'ять впливних величин, а саме $H_B, c_\kappa, m_\kappa, DQ_\kappa, f_{к\kappa}, V_{2\kappa}, f_{к\theta}, f_{2\theta}, K$) сум квадратів відповідних стандартних непевностей типу В $u_B(y_j)$ результатів вимірювань величин – аргументів y_k , тобто $H_B, c_\kappa, m_\kappa, DQ_\kappa, f_{к\kappa}, V_{2\kappa}, f_{к\theta}, f_{2\theta}, K$ [11]:

$$u_{cB}(H_{H,i}) = \sqrt{\sum_{j=1}^9 S_j^2 u_B^2(y_j)} = \sqrt{S_{H_{B,i}}^2 u_B^2(H_{B,i}) + S_{c_\kappa}^2 u_B^2(c_\kappa) + S_{m_{\kappa,i}}^2 u_B^2(m_{\kappa,i}) + S_{\Delta\theta_{\theta,i}}^2 u_B^2(\Delta\theta_{\theta,i}) + S_{f_{к\kappa}}^2 u_B^2(f_{к\kappa}) + S_{V_{2\kappa,i}}^2 u_B^2(V_{2\kappa,i}) + S_{f_{к\theta}}^2 u_B^2(f_{к\theta}) + S_{f_{2\theta}}^2 u_B^2(f_{2\theta}) + S_K^2 u_B^2(K)}, \text{МДж}/\text{м}^3, \tag{12}$$

де $S_1 = S_{H_{B,i}}$ – коефіцієнт впливу непевності $u_B(H_{B,i})$;
 $S_2 = S_{c_\kappa}, \text{г}/\text{м}^3$ – коефіцієнт впливу непевності $u_B(c_\kappa)$;

$S_3 = S_{m_{\kappa,i}}, \text{МДж}/(\text{г}^\circ\text{C}\cdot\text{м}^3)$ – коефіцієнт впливу непевності $u_B(m_{\kappa,i})$;
 $S_4 = S_{DQ_{\theta,i}}$ – коефіцієнт впливу непевності $u_B(DQ_{\theta,i}), \text{МДж}/(\text{г}^\circ\text{C}\cdot\text{м}^3)$;
 $S_5 = S_{f_{к\kappa}}, \text{МДж}/\text{м}^3$ – коефіцієнт впливу непевності $u_B(f_{к\kappa})$;
 $S_6 = S_{V_{2\kappa,i}}, \text{МДж}/(\text{г}^\circ\text{C}\cdot\text{м}^6)$ – коефіцієнт впливу непевності $u_B(V_{2\kappa,i})$;
 $S_7 = S_{f_{к\theta}}, \text{МДж}/\text{м}^3$ – коефіцієнт впливу непевності $u_B(f_{к\theta})$;
 $S_8 = S_{f_{2\theta}}, \text{МДж}/(\text{г}^\circ\text{C}\cdot\text{м}^3)$ – коефіцієнт впливу непевності $u_B(f_{2\theta})$;
 $S_9 = S_K, \text{МДж}/(\text{г}^\circ\text{C}\cdot\text{м}^3)$ – коефіцієнт впливу непевності $u_B(K)$.

Вирази для знаходження коефіцієнтів впливу S_k ($k = 1, 2, \dots, 9$), які наведені у табл. 3, отримані із (7) як частинні похідні результату вимірювання нижчої питомої об'ємної теплоти згоряння i -ї проби досліджуваного газу $H_{H,i}$ по кожному аргументу y_k , тобто по $H_B, c_\kappa, m_\kappa, DQ_\kappa, f_{к\kappa}, V_{2\kappa}, f_{к\theta}, f_{2\theta}, K$:

$$S_k = \frac{\partial H_{H,i}}{\partial y_k}, k = 1, 2, \dots, 9. \tag{13}$$

4.4. Знаходження значень складових комбінованих непевностей типу В $u_{cB}(H_{B,i})$ та $u_{cB}(H_{H,i})$ результатів вимірювання вищої $H_{B,i}$ та нижчої $H_{H,i}$ питомої об'ємної теплоти згорання i -ї проби досліджуваного газу калориметричним методом. Значення стандартних непевностей $u_B(x_j)$ результатів вимірювань величин x_j , $j=1,2,\dots,7$, тобто величин c_6 , m_6 , DQ_6 , V_{z6} , $f_{к6}$, f_{z6} , K , які входять у формулу (10) для визначення комбінованої стандартної непевності типу В $u_{cB}(H_{B,i})$ результату вимірювання вищої питомої об'ємної теплоти згорання i -ї проби досліджуваного газу $H_{B,i}$, знаходимо за формулою [11]:

$$u_B(x_j) = \frac{Dx_{j,зр}}{\sqrt{3}}, \quad (14)$$

де $Dx_{j,зр}$ – граничні відхилення значень величин c_6 , m_6 , DQ_6 , V_{z6} , $f_{к6}$, f_{z6} , K від отриманих результатів їх вимірювань, тобто $Dc_{6,зр}$, МДж/(г·°С); $Dm_{6,зр}$, г; $D(DQ_6)_{зр}$, °С; $DV_{z6,зр}$, м³; $Df_{к6,зр}$; $Df_{z6,зр}$; $DK_{зр}$.

Аналогічно знаходимо значення стандартних непевностей $u_B(y_k)$ результатів вимірювань величин y_k , $k=1,2,\dots,9$, тобто величин H_B , $c_{к}$, $m_{к}$, DQ_6 , $f_{кв}$, $V_{зк}$, $f_{кв}$, $f_{zл}$, K , які входять у формулу (12) для визначення комбінованої стандартної непевності типу В $u_{cB}(H_{H,i})$ результату вимірювання нижчої питомої об'ємної теплоти згорання i -ї проби досліджуваного газу $H_{H,i}$:

$$u_B(y_k) = \frac{Dy_{k,зр}}{\sqrt{3}}, \quad (15)$$

де $Dy_{k,зр}$ – граничні відхилення значень величин H_B , $c_{к}$, $m_{к}$, $f_{кв}$, $V_{зк}$, $f_{кв}$, $f_{zл}$, K від отриманих результатів їх вимірювань, тобто $DH_{B,зр}$, МДж/м³; $Dc_{к,зр}$, МДж/(г·°С); $Dm_{к,зр}$, г; $D(DQ_6)_{зр}$, °С; $Df_{кв,зр}$; $DV_{зк,зр}$, м³; $Df_{кв,зр}$; $Df_{zл,зр}$; $DK_{зр}$.

Формули (14) та (15) отримані із умови, що густина розподілу можливих відхилень Dx_j та Dy_k значень величин x_j та y_k від одержаних результатів їх вимірювань у межах визначених граничних відхилень $\pm Dx_{j,зр}$ та $\pm Dy_{k,зр}$ рівномірна [11].

Числові значення граничних відхилень $\pm Dx_{j,зр}$ та $\pm Dy_{k,зр}$ значень величин x_j та y_k від отриманих результатів їх вимірювань знаходимо на підставі аналізу метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), які використовують для вимірювання величин x_j та y_k , і довідкових даних, наведених у ГОСТ 27193-86 [5].

4.5. Знаходження стандартної непевності типу А $u_A(H_B)$ та $u_A(H_H)$ результатів вимірювання вищої H_B та нижчої H_H питомої об'ємної теплоти згорання досліджуваного газу. Оскільки значення як вищої H_B , так і нижчої H_H питомої об'ємної теплоти згорання аналізованого газу знаходять за (8) як середнє арифметичне отриманих значень $H_{B,i}$ та $H_{H,i}$ із виконаної серії n проб, то оцінки стандартної непевності типу А $u_A(H_B)$ та $u_A(H_H)$ результатів вимірювання вищої H_B та нижчої H_H питомої об'ємної теплоти згорання досліджуваного газу встановлюють за формулами [11]:

$$u_A(H_B) = \frac{s_{H_B}}{\sqrt{n}}, \text{ МДж/м}^3$$

$$\text{та } u_A(H_H) = \frac{s_{H_H}}{\sqrt{n}}, \text{ МДж/м}^3, \quad (16)$$

де s_{H_B} та s_{H_H} – оцінки стандартних (середніх квадратичних) відхилень окремих значень $H_{B,i}$ та $H_{H,i}$ відповідно від середніх значень H_B та H_H , розрахованих за формулами (8), яка дорівнюють:

$$s_{H_B} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (H_{B,i} - H_B)^2} \text{ та}$$

$$s_{H_H} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (H_{H,i} - H_H)^2}, \text{ МДж/м}^3. \quad (17)$$

Згідно із ГОСТ 27193-86 [5] $n=3$, хоч, як уже зазначено вище, на думку авторів, для отримання достовірних результатів вимірювань доцільно здійснювати не менше від п'яти проб.

4.6. Знаходження комбінованих стандартних непевностей $u_c(H_B)$ та $u_c(H_H)$ і розширених стандартних непевностей $U_p(H_B)$ та $U_p(H_H)$ результатів вимірювання вищої H_B та нижчої H_H питомої об'ємної теплоти згорання досліджуваного газу. Оцінки комбінованих стандартних непевностей $u_c(H_B)$ та $u_c(H_H)$ визначимо як корінь квадратний із суми квадратів знайдених значень стандартних непевностей типу А $u_A(H_B)$ та $u_A(H_H)$ та комбінованих стандартних непевностей типу В $u_{cB}(H_{B,i})$ та $u_{cB}(H_{H,i})$ результатів вимірювання вищої $H_{B,i}$ та нижчої $H_{H,i}$ питомої об'ємної теплоти згорання i -ї проби досліджуваного газу за формулами:

$$u_c(H_B) = \sqrt{u_A^2(H_B) + u_{cB}^2(H_{B,i})}$$

та $u_c(H_H) = \sqrt{u_A^2(H_H) + u_{cB}^2(H_{H,i})}$, МДж/м³. (18)

Розширені стандартні непевності $U_p(H_B)$ та $U_p(H_H)$ результатів вимірювання вищої H_B та нижчої H_H питомої об'ємної теплоти згоряння аналізованого газу для заданого рівня довіри p обчислюємо за формулами:

$$U_p(H_B) = k_p \times u_c(H_B), \text{ МДж/м}^3$$

та $U_p(H_H) = k_p \times u_c(H_H), \text{ МДж/м}^3$, (19)

де k_p – коефіцієнт розширення (охоплення), який згідно із рекомендацією настанови ДСТУ-Н РМГ 43:2006 [12] для рівня довіри $p = 0,95$ дорівнює 1,96.

5. Результати експериментальних досліджень проб природного газу. Автори у хіміко-аналітичній лабораторії ГПУ “Львівгазвидобування” виконали експериментальні дослідження п’яти проб ПГ з метою визначення вищої H_B та нижчої H_H питомої об’ємної теплоти згоряння досліджуваного газу та аналізу точності отриманих результатів вимірювань, оцінивши їх непевність за описаною у статті методикою. Результати опрацювання експериментальних досліджень наведено у табл. 4, 5.

Після опрацювання результатів експерименту отримано результат вимірювання вищої питомої об’ємної теплоти згоряння досліджуваного природного газу H_B :

$$H_B = (38,35 \pm 0,25) \text{ МДж/м}^3; U_{0,95}(H_B) = 0,25 \text{ МДж/м}^3;$$

$$p = 0,95; k_p = 1,96.$$

Таблиця 4

Результати аналізу точності вимірювання вищої питомої об’ємної теплоти згоряння досліджуваного газу H_B

№ з/п	Назва, умовне позначення та розмірність показника $x_j, j = 1, 2, \dots, 7$	Числове значення показника x_j	Граничне відхилення $Dx_{i,zp}$	Стандартна непевність $u_B(x_j)$
1	Питома теплоємність води c_w , МДж/(г·°C)	$4,187 \cdot 10^{-6}$	$\pm 0,43 \cdot 10^{-7}$	$0,234 \cdot 10^{-7}$
2	Маса потоку води m_w , г	3500	$\pm 1,00$	0,58
3	Середня різниця температур води на вході та виході калориметра DQ_w , °C	10,35	$\pm 0,12$	0,07
4	Об’єм газу спалюваного газу V_{zg} , м ³	4,000	$\pm 0,020$	0,0115
5	Коефіцієнт поправки до показів калориметра для H_B, f_{kw}	1,0061	$\pm 2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,16 \cdot 10^{-3}$
6	Коефіцієнт поправки до показів газового лічильника f_{zL}	1,004	$\pm 1,0 \cdot 10^{-3}$	$0,58 \cdot 10^{-3}$
7	Коефіцієнт приведення об’єму спалюваного газу до стандартних умов K	1,003	$\pm 1,0 \cdot 10^{-3}$	$0,58 \cdot 10^{-3}$

Таблиця 5

Результати аналізу точності вимірювання нижчої питомої об’ємної теплоти згоряння досліджуваного газу H_H

№ з/п	Назва, умовне позначення та розмірність показника $y_k, k = 1, 2, \dots, 8$	Числове значення показника y_k	Граничне відхилення $Dy_{k,zp}$	Стандартна непевність $u_B(y_k)$
1	Вища питома об’ємна теплота згоряння досліджуваного газу H_B , МДж/м ³	38,35	$\pm 0,43$	0,25
2	Питома теплота конденсації водяної пари c_k , МДж/(г·°C)	$2,454 \cdot 10^{-3}$	$\pm 0,25 \cdot 10^{-4}$	$0,145 \cdot 10^{-4}$
3	Маса зібраного конденсату водяної пари m_k , г	60,50	$\pm 1,00$	0,58
4	Середня різниця температур води на вході та виході калориметра DQ_w , °C	10,35	$\pm 0,12$	0,07
5	Коефіцієнт поправки до показів калориметра для H_H, f_{kh}	1,0068	$\pm 2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,16 \cdot 10^{-3}$
6	Об’єм газу, який згоряє у калориметрі під час збирання конденсату V_{zk} , м ³	40,500	$\pm 0,020$	0,0115
7	Коефіцієнт поправки до показів калориметра для H_B, f_{kw}	1,0061	$\pm 2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,16 \cdot 10^{-3}$
8	Коефіцієнт поправки до показів газового лічильника f_{zL}	1,004	$\pm 1,0 \cdot 10^{-3}$	$0,58 \cdot 10^{-3}$
9	Коефіцієнт приведення об’єму спалюваного газу до стандартних умов K	1,003	$\pm 1,0 \cdot 10^{-3}$	$0,58 \cdot 10^{-3}$

Після опрацювання результатів експерименту одержано такий результат вимірювання нижчої питомої об'ємної теплоти згоряння досліджуваного природного газу H_H :

$$H_H = (34,65 \pm 0,35) \text{ МДж/м}^3;$$

$$U_{0,95}(H_H) = 0,35 \text{ МДж/м}^3; p = 0,95; k_p = 1,96.$$

Висновки. 1. У чинних сьогодні в Україні нормативних документах щодо вимірювання питомої теплоти згоряння (теплотворної здатності) природного газу калориметричним методом не регламентовано методику оцінювання точності вимірювання питомої теплоти згоряння газу, що не дає змоги отримати результат вимірювання із вказуванням характеристик його точності, як вимагає Закон України про метрологію та метрологічну діяльність.

2. Розроблена у статті методика оцінювання точності вимірювання питомої теплоти згоряння (теплотворної здатності) природного газу калориметричним методом, яка полягає у визначенні непевності отриманих результатів вимірювання, повністю відповідає вимогам сучасної світової метрології щодо забезпечення єдності вимірювань і може використовуватись у газовій промисловості України, зокрема для визначення енергетичної цінності природного газу і встановлення відповідної ціни на нього.

1. Мотало А.В. Методика оцінювання якості природного газу як джерела енергії / Мотало А.В., Мотало В.П., Стадник Б.І. // Стандартизація, сертифікація, якість, 2009. – № 4. – С. 56–61. 2. Газ природний. Методы расчета физических свойств. Общие положения: ГОСТ 30319.0-96. – [Дата введенья 2000.01.01]. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. – 7 с. – (Межгосударственный стандарт). 3. Гордієнко А.І. До питання переходу на облік природного газу як енергоносія / Гордієнко А.І., Богомолець І.Г., Чуб М.В. // Нафтова і газова промисловість, 2001. – № 3. – С. 42–43. 4. Лур'є А.І. Перспективи переходу газової галузі України на облік природного газу за його енергетичною цінністю / Лур'є

А.І., Хвостова О.В., Наконечний Я.Б. // Питання розвитку газової промисловості України: Збірник наукових праць УкрНДІгаз. – 2008. – Вип. 36. – С. 173–177. 5. Газы горючие природные. Метод определения теплоты сгорания водяным калориметром: ГОСТ 27193-86. – [Дата введенья 01.01.88]. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 13 с. – (Государственный стандарт Союза ССР). 6. Газы горючие природные. Расчетный метод определения теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе: ГОСТ 22667-82. – [Дата введенья 01.07.83]. – М.: Издательство стандартов, 1982. – 4 с. – (Государственный стандарт Союза ССР). 7. Природный газ. Визначення складу із заданою невизначеністю методом газової хроматографії. Частина 2. Характеристики вимірювальної системи і статистичне оброблення даних: ДСТУ ISO 6974-2:2007. – [Чинний від 2008-10-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2008. – 21 с. – (Національний стандарт України). 8. Основи метрології та вимірювальної техніки: [підручник для вузів в двох томах] / [М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник та ін.]; за ред. Б.І. Стадника. – Львів: Вид-во Національного університету “Львівська політехніка”. – 2005. – Т1. Основи метрології. – 532 с. 9. Закон України про метрологію та метрологічну діяльність, № 1765-IV від 15.06.2004 р. / Верховна Рада України. – Офіц. вид.– К.: Парлам. вид-во, 2004. – 22 с. – (Бібліотека офіційних видань).– (Закон України). 10. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій: ДСТУ ISO/IEC 17025:2006. – [Чинний від 2007-07-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2007. – 26 с. – (Національний стандарт України). 11. Дорожовець М.М. Опрацювання результатів вимірювань: навч. посіб. / М.М. Дорожовець. – Львів: Вид-во Нац. уні-ту “Львівська політехніка”, 2007. – 624 с. 12. Метрологія. Застосування “Руководства по выражению неопределенности измерений”: ДСТУ-Н РМГ 43:2006. – [Чинна від 2007-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2006. – 20 с. – (Настанове).