

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ЯК ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

Б. Стадник, доктор технічних наук, професор,
В. Мотало, кандидат технічних наук, доцент,
Національний університет «Львівська політехніка»,
А. Мотало, старший економіст,
Газопромислове управління «Львівгазвидобування», м. Львів

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ КАЧЕСТВА ПРИРОДНОГО ГАЗУ ЯК ИСТОЧНИКА Енергії

Б. Стадник, доктор технических наук, профессор,

В. Мотало, кандидат технических наук, доцент;

Нацональный университет «Львовская политехника»,

А. Мотало, старший экономист,

Газопромышленное управление «Львовгаздобыча», г. Львов

QUALITY ESTIMATION TECHNIQUE OF NATURAL GAS AS AN ENERGY SOURCE

B. Stadnyk, Doctor of Technical Sciences, Professor;

V. Motalo, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor;

«Lvivska Politehnika» National University;

A. Motalo, Senior Economist,

Gas Industrial Board «Lviv Gas Production», Lviv

ВСТУП

Найбільшою сферою використання ПГ як джерела енергії є промислове виробництво та комунально-побутове господарство. В умовах неперервного зростання об'ємів споживання ПГ та світових цін на його актуальнішими стають вимоги до його якості та методики її визначення [1—4]. Однак, незважаючи на високу енергетичну та хімічну щільність ПГ, в Україні не вироблено систематизований підхід до оцінювання його якості. Зокрема, при встановленні ціни на ПГ його якість не враховується зовсім. Це зумовлене низкою причин, аналіз і шляхи розв'язання яких є предметом розгляду даної статті.

У статті розроблено та проаналізовано методику комплексного оцінювання якості природного газу (ПГ) як джерела енергії. Методика ґрунтуються на визначені теплотвірної здатності ПГ як визначального показника якості з урахуванням усіх його компонентів: як тих, що позитивно впливають на теплотвірну здатність газу та вміст енергії в ньому, так і тих, що впливають негативно.

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПГ ЯК ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

Саме поняття «якість» ПГ в нормативних документах (НД) України означене не чітко, як і не передбачена диференціація вимог до його якості. У більшості європейських країн основною якісною характеристикою газу є число Воббе, яке є функцією калорійності та відносної густини. Згідно із чиєним стандартом ISO 13686:1998 [5] ПГ за числом Воббе

розділені на дві групи (два сорти): *H*-газ (межі числа Воббе становлять 48,36 — 57,87 МДж/м³) та *L*-газ (межі числа Воббе становлять 41,28 — 47,38 МДж/м³). Ці групи поділяються на підгрупи, за якими і визначається ціна на газ для побутових споживачів. Наприклад, у Німеччині ПГ групи *H* поділяють на підгрупи *E* та *E₁*, а групи *L* — на підгрупи *L₁* та *L₂*, у Франції таких підгруп є ще — *E₂*, ..., *E_n* та *L₃*, ..., *L_m*.

В Україні єдиним критерієм якості ПГ є його водогість, яка в чинних НД [6, 7] відображеня температурою точки роси ПГ по волозі Θ_r , °C і характеризує транспортну кондиційність газу та його здатність забезпечувати безаварійне функціонування систем газопостачання.

ПГ, який добувають в Україні, за складовими компонентами поділяється на три групи [3]:

- із переважним вмістом легких вуглеводнів;
- із підвищеним вмістом фракцій важких вуглеводнів;
- із великим вмістом вуглекислого газу CO₂.

Також необхідно враховувати географічне положення і кліматичні особливості кожного газового родовища:

- ПГ більшості родовищ України характеризуються підвищеною вологістю (0,2 — 0,8 г/м³);
- ПГ родовищ України є висококалорійними (число Воббе лежить у межах 50 — 54 МДж/м³);
- наявність у складі газової суміші корозійно-активних компонентів, таких як сірководень H₂S та вуглекислий газ CO₂, окрім негативного впливу на технологічне обладнання, що й впливає на калорійність газу — перший її підвищує, а другий — знижує.

Отже, оцінювання якості ПГ як джерела енергії повинне бути комплексним і враховувати співвідношення таких його характеристик: калорійність (теплотворна здатність), вологість, наявність і кількість негорючих та корозійно-активних компонентів. Доцільним є сортування газу за якістю і встановлення відповідної ціни на газ залежно від його енергетичної цінності. Для цього необхідно насамперед розробити методику об'єктивного оцінювання якості ПГ як джерела енергії та увести зміни до відповідних НД щодо якості газу. Актуальність і проблематичність зазначеніх питань і зумовили тематику даної статті.

ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою даної статті є розроблення методики комплексного оцінювання якості ПГ як джерела енергії.

Основні завдання дослідження:

- вибір концепції оцінювання якості ПГ;
- аналіз впливу фізико-хімічних властивостей ПГ на його енергетичну цінність;

- встановлення визначального (головного) показника якості ПГ як джерела енергії;
- визначення функціональної залежності між фізико-хімічними властивостями ПГ та визначальним (головним) показником якості;
- проведення експериментального дослідження розробленої методики оцінювання якості ПГ.

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ МЕТОДИКИ

ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ

ПГ ЯК ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

Вибір концепції оцінювання якості ПГ. Виходячи із теоретичних засад кваліметрії, найефективнішим методом оцінювання якості продукції загалом є комплексний метод, за яким комплексний показник якості продукції P_B визначають як функцію від ряду її властивостей P_i , тобто $P_B = f(P_i)$, $i = 1, 2, \dots, m$ (тут m — число властивостей) [8]. Даний комплексний показник є визначальним або головним якості продукції [9]. Проаналізуємо можливість використання такої методики для оцінювання якості ПГ.

Визначення оптимальної структури показників якості ПГ. У [2] здійснено систематизацію показників якості газу за різними групами залежно від його призначення та потреб споживачів. Із проведеного авторами аналізу випливає висновок, що найважливішими фізико-хімічними показниками ПГ, які характеризують його якість, є:

- питома об'ємна теплота згоряння вища H_u , МДж/м³ (ккал/м³);
- питома об'ємна теплота згоряння нижча H_n , МДж/м³ (ккал/м³);
- число Воббе B , МДж/м³ (ккал/м³);
- густина ρ , кг/м³ (ідносна густина δ);
- вологість газу (абсолютна W , г/м³ або відносна φ , %);
- концентрація вуглекислого газу C_{CO_2} , %;
- концентрація азоту C_{N_2} , %;
- вміст сірководню C_{H_2S} , г/м³;
- вміст метилмеркаптану (меркаптанової сірки) C_{CH_3S} , г/м³.

Основним показником якості ПГ, який визначає його енергетичну цінність є питома об'ємна теплота згоряння або теплотворна здатність газу H . Її визначають як кількість тепла, яке виділяється у процесі повного згоряння газу в повітрі при стисному тиску p_u і сталій температурі T_u , віднесено до об'єму сухого газу, визначеного за стандартних умов, тобто при тиску $p_c = 0,101325$ МПа і температурі $T_c = 293,15$ К [10]. Розрізняють нижчу (H_n) та вищу (H_u) питому об'ємну теплоту згоряння. Нижчу визначають за наявності водяної пари в продуктах згоряння газу при температурі T_{dp} , а вищу — після повної конденсації водяної пари, яка міститься в продуктах згоряння газу за температури T_{dp} .

Значення H_n ПГ залежить від вмісту у газовій суміші горючих компонентів — метану та важких вуглеводнів (пропану, бутану, етану тощо).

Значення нижчої питомої теплоти згоряння H_n природного газу, який подається в магістральні газопроводи з родовищ України, коливається від 31,8 до 36,6 МДж/м³ (від 7600 до 8900 ккал/м³) [7], а H_n газу, який подається для промислового та комунально-побутового використання, тобто як джерела енергії, відповідно до [6] не повинне бути меншим від 31,8 МДж/м³ (7600 ккал/м³).

Важливість теплотворної здатності газу, як його визначальної енергетичної характеристики, підтверджується тим, що в більшості країн світу для здійснення розрахунків між споживачем та постачальником газу використовують такий його показник, як вміст енергії E , який визначають як добуток об'єму газу V , м³ на його H_n [1]:

$$E = V \cdot H_n. \quad (1)$$

Сьогодні в Україні питому об'ємну теплоту згоряння ПГ H_n (нижчу H_n та вищу H_h) визначають розрахунковим методом за компонентним складом газу відповідно до вимог ГОСТ 22667—83 [11], а компонентний склад газу — хроматографічним методом відповідно до вимог ГОСТ 23781—83 [12], тобто

$$H_n = \sum_{i=1}^n H_{n_i} \cdot c_i, \quad (2)$$

$$H_h = \sum_{i=1}^n H_{h_i} \cdot c_i, \quad (3)$$

де H_{n_i} та H_{h_i} — відповідно вища та нижча питома об'ємна теплота згоряння i -го компонента газу, МДж/м³; c_i — концентрація i -го компонента газу в газовій суміші; n — число компонентів складу газу.

Розрахунковий метод визначення питомої об'ємної теплоти згоряння ПГ має суттєві недоліки. Він не враховує те, що навіть після осушування газ не є повністю вільний від вологи [13], тобто визначений за (1) вміст енергії газу E не є його реальним показником.

Число Воббе B є основним показником якості ПГ, який характеризує процес його згоряння в побутових газових приладах. Його значення визначає повноту згоряння газу, тобто згоряння без утворення сажі, смол, з мінімальним виділенням оксиду вуглецю, стабільність горіння без зриву і блисків полум'я.

Для комунально-побутової галузі можуть використовуватися ПГ значення числа Воббе яких лежить у межах від 41,2 до 54,5 МДж/м³ (9850 — 13000 ккал/м³). Однак для забезпечення нормальної роботи побутових газових приладів у кожному конкретному випадку встановлюється нормальне значення числа Воббе, а відхилення від нього не повинне перевищувати $\pm 5\%$ [6].

Густину газу ρ , кг/м³ визначають піксометричним методом відповідно до вимог ГОСТ 17310-86 [13]

за стандартних умов, а відносну густину d обчислюють за формулою:

$$d = \rho / \rho_0, \quad (4)$$

де ρ_0 — густина сухого повітря. За стандартних умов $\rho_0 = 1,205 \text{ кг}/\text{м}^3$.

На практиці значення відносної густини d визначають за формулою:

$$d = \sum_{i=1}^n d_i \cdot c_i, \quad (5)$$

де d_i — відносна густина i -го компонента газу, і використовують для визначення числа Воббе (нижчого B_n та вищого B_h) за формулами [11]:

$$B_n = H_n / \sqrt{d}, \quad B_h = H_h / \sqrt{d}, \quad (6)$$

тобто число Воббе є функцією теплоти згоряння і густини газу.

Наявність вологи не лише знижує теплотворну здатність ПГ і відповідно, його якість як джерела енергії [15], але її зумовлює утворення кристалідіратів, що сприяє розвитку процесів корозії газопроводів і газових апаратів та порушує роботу автоматики. Однак, в чинних НД [6, 7] регламентуються вимоги лише до одної гігрометричної характеристики ПГ — температури точки роси Θ , по відношенню до вуглеводнів, яка є важливішою для осушувачів і транспортування газу, ніж для промислового та комунально-побутового використання. Тому додільно нормувати вологість і ураховувати її при визначені теплотворної здатності ПГ.

Азот, вуглекислий газ та метилмеркаптан належать до негорючих компонентів газу і мають негативний вплив на його якість, оскільки при згорянні не створюють тепла, але входять до загального спожитого об'єму і впливають на його вартість. Сірководень хоч і є горючим компонентом ПГ, але разом із метилмеркаптаном належать до шкідливих його компонентів, оскільки є корозійно-активним і за наявності вологи сприяє розвитку процесів корозії внутрішньої поверхні газопроводів і газових апаратів та забруднює атмосферу токсичними продуктами згоряння. Для газів комунально-побутового та промислового призначення вміст сірководню обмежується значеннями від 0,005 до 0,02 г/м³, а метилмеркаптану — не більше 0,036 г/м³ [6].

Встановлення визначального показника якості ПГ. Виходячи з наведеного аналізу, для оцінювання енергетичної цінності ПГ за визначальний (головний) показник якості доцільно прийняти його теплотворну здатність, а усі його фізико-хімічні властивості за характером впливу на енергетичну цінність можна розділити на дві групи:

- які позитивно впливають на теплотворну здатність газу: концентрації у газовій суміші горючих компонентів — метану та важких вуглеводнів;

• які негативно впливають на теплотвірну здатність газу: наявність вологи та негорючих компонентів — азоту, вуглеводного газу та метилмеркаптану.

Розглянемо функціональні зв'язки між тепло-твірною здатністю газу та його властивостями.

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОТВІРНОЇ ЗДАТНОСТІ ПГ

Визначення питомої об'ємної теплоти згоряння ПГ як функції його вологості. Повне згоряння газу спостерігається тоді, коли в продуктах згоряння відсутні горючі газові компоненти або компоненти неповного окислення. Зазвичай, у продуктах згоряння газу міститься водяна пар, маса якої складається з трьох частин:

- утворена з вологи, яка міститься в складі самого газу;
- яка утворюється в результаті окислення компонентів газу, зокрема водню;
- яка вноситься з повітрям, використаним для горіння газу.

Усе тепло, яке виділилося в процесі горіння газу, сприймається продуктами згоряння і може бути повністю відібране від них та повністю використане лише за умови охолодження їх до температури нижчої від температури точки роси газу по вологості Θ_p . Однак на практиці таке глибоке охолодження продуктів згоряння, зазвичай, не здійснюється і приховано теплота пароутворення водяної пари, яка міститься в продуктах згоряння ПГ, не використовується.

Отже, нижчу питому об'ємну теплоту згоряння $H_{n,p}$ ПГ можна визначити за формулою:

$$H_{n,p} = H_b - q_{n,o} \cdot (m_n + m_{n,o}), \quad (7)$$

де m_n — маса водню у складі газу, кг; $m_{n,o}$ — маса води у складі газу, кг; $q_{n,o}$ — кількість тепла, необхідного для нагрівання 1 кг води до кипіння та випаровування, МДж/кг.

Розглянемо складові формулі (7) задля її практичного використання. Вишу питому об'ємну теплоту згоряння H_b доцільно визначити розрахунковим шляхом за формулою (2) згідно з методикою [11]. За умови нагрівання 1 кг води від 273 К до 373 К за тиску $p_c = 0,101325$ МПа, $q_{n,o} = 2,51$ МДж/кг. Масу води у складі газу $m_{n,o}$ визначаємо залежно від його вологості.

Вологість W природного газу за стандартних умов згідно з ГОСТ 20060—83 [16] залежно від ви-їреної точки роси газу по вологості Θ_p , обчислюють за формулою:

$$W = 101,325 \frac{A(\Theta_p)}{p} + B(\Theta_p), \quad (8)$$

де $A(\Theta_p)$ — коефіцієнт залежності вмісту води від тиску водяної пари за вимірюваною точкою роси по вол-

огоді Θ_p , г/м³; p — абсолютний тиск досліджуваного газу у вимірювальній камері, кПа; $B(\Theta_p)$ — коефіцієнт залежності вмісту вологи від точки роси по вологості Θ_p і компонентного складу газу, г/м³.

Оскільки абсолютна вологість W дорівнює масі водяної пари $m_{n,o}$, яка міститься в 1 м³ паро-газової суміші [13], тобто:

$$W = \frac{m_{n,o}}{V}, \quad (9)$$

то за умови, що $V = 1 \text{ м}^3$, $m_{n,o} = W \cdot 10^{-3}$ кг.

Отже, формула (7) є робочою формулою для визначення нижчої питомої об'ємної теплоти згоряння $H_{n,p}$ ПГ з урахуванням його вологості.

Урахування впливу на питому об'ємну теплоту згоряння ПГ негорючих компонентів. Під час установлення ціни на газ доцільно увести поправку для врахування частки негорючих компонентів у загальному об'ємі спожитого газу.

Таку поправку можна визначити із наступних міркувань. Кількість тепла, яке виділяється при згорянні будь-якого теплоносія, залежить від його маси, а за відомого об'єму — від його густини [17, 18]. Отже, вишу питому об'ємну теплоту згоряння $H_{n,p}$ реального газу, можна визначити за формулою:

$$H_{n,p} = H_b \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho} \right), \quad (10)$$

де ρ_w — густина частини ПГ, яка складається виключно із негорючих компонентів, кг/м³; ρ — сумарна густина ПГ з урахуванням всіх його компонентів, кг/м³.

Отже, з урахуванням (7) і (10) теплотвірну здатність реального ПГ $H_{n,p}$, з урахуванням його вологості та вмісту негорючих компонентів можна визначити за формулою:

$$H_{n,p} = H_b \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho} \right) - q_{n,o} \cdot (m_n + m_{n,o}). \quad (11)$$

Значення нижчої питомої об'ємної теплоти згоряння ПГ $H_{n,p}$ визначене за формулою (11), реально відображає енергетичну цінність 1 м³ спожитого газу, яку можна використати для установлення його ціни.

ВИЗНАЧЕННЯ ЯКОСТІ ПГ ЗА РОЗРОБЛЕНОЮ МЕТОДИКОЮ

Автори провели експериментальні дослідження проб ПГ, відібраних із одного газового родовища упродовж року. Для експериментального дослідження теплотворної здатності ПГ за розробленою методикою визначено його компонентний склад та вологість.

Визначення компонентного складу здійснювалося у лабораторії з використанням хроматографа

Результати дослідження

Дата	05.01	05.02	05.03	05.04	05.05	05.06	05.07	05.08	05.09	05.10	05.11	05.12
H_{th} , МДж/м ³	37,55	37,50	37,34	37,41	37,41	37,41	37,38	37,56	37,33	37,36	37,39	37,37
$H_{\text{н,т}}$, МДж/м ³	33,84	33,80	33,65	33,71	33,71	33,70	33,68	33,85	33,63	33,67	33,69	33,67
Θ_p , °C	-5,7	-5,5	-4,4	-5,2	-4,9	-3,5	-3,8	-2,9	-3,0	-3,8	-3,4	-4,0
W , т/м ³	0,097	0,098	0,105	0,099	0,110	0,119	0,115	0,124	0,123	0,113	0,114	0,112
ρ_c , кг/м ³	0,685	0,688	0,682	0,688	0,688	0,684	0,684	0,691	0,687	0,685	0,687	0,684
$\rho_e \cdot 10^{-2}$, кг/м ³	0,567	0,527	0,554	0,651	0,627	0,573	0,573	0,551	0,603	0,559	0,581	0,573
$H_{\text{н,р}}$, МДж/м ³	32,81	32,77	32,01	29,69	31,46	31,27	27,59	30,32	26,97	29,63	31,41	33,28

типу «Кристалл-2000М». Вимірювання та опрацювання експериментальних даних здійснювалося за методикою згідно з вимогами, регламентованими у [12]. На основі отриманих даних визначено значення вищої питомої об'ємної теплоти згоряння газу H_{th} , густини газової суміші ρ_c , густини негорючих компонентів ρ_e і теоретичне значення $H_{\text{н,т}}$ ПГ.

Визначення вологості газу проводилося конденсаційним методом у лабораторії безпосередньо на газовому родовищі з використанням гірометра «Харків-2». Отже, безпосередньо вимірюваною величиною в експерименті була температура точки роси по вологій Θ_p , а вологість W визначено за формулою (8).

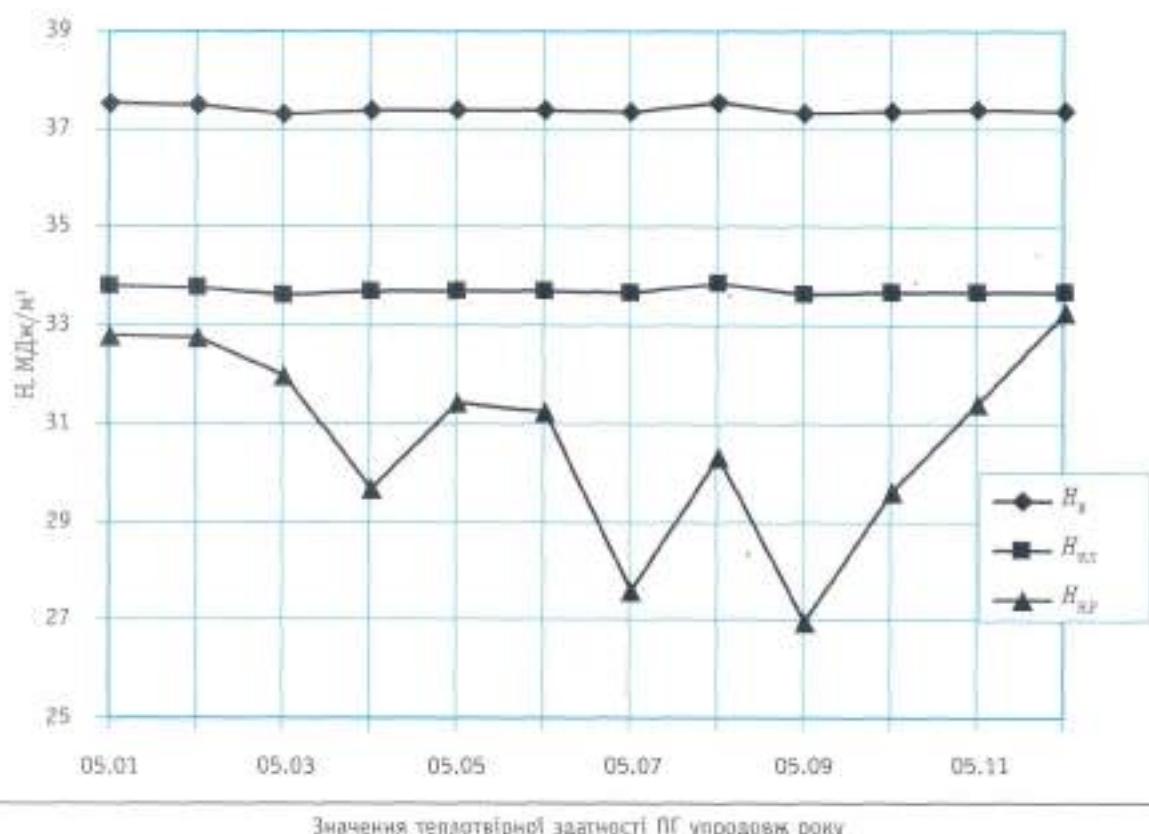
За результатами експериментальних досліджень проб ПГ за формулою (11) визначено значення реальної теплотвірної здатності газу $H_{\text{н,р}}$ на п'яту добу кожного місяця упродовж року. Результати експе-

риментальних досліджень наведено у таблиці, а динаміку змін $H_{\text{н,р}}$ теоретичної $H_{\text{н,т}}$ і реальної газу $H_{\text{н,р}}$ відображенено на рисунку.

Результати експериментальних досліджень проб ПГ (дані на п'яту добу кожного місяця упродовж року за умови $p_c = 0,101325$ МПа і температури $T_c = 293,15$ K)

Як видно з даних таблиці та графіків, реальна теплотворна здатність ПГ $H_{\text{н,р}}$ визначена з урахуванням вологості газу та наявності у його складі негорючих компонентів, суттєво відрізняється від теоретичної $H_{\text{н,т}}$ визначеній за [11], навіть за умови, що у досліджуваному газовому родовищі концентрація вуглекислого газу та азоту невелика, а меркантанова сірка відсутня зовсім.

Отже, проведені експериментальні дослідження проб ПГ повністю підтвердили теоретичні засади



розробленої авторами методики оцінювання його якості як джерела енергії та можливість використання результатів даної роботи у практичній діяльності газо-промислових підприємств під час оцінювання якості та встановлення відповідної ціни на ПГ, а також при розробленні нових НД щодо регламентації немає до його якості.

ВИСНОВКИ

Неухильне зростання світових цін на ПГ ставить підвищенню вимоги до його якості та до методики оцінювання якості. Однак, незважаючи на високу енергетичну та хімічну цінність ПГ, в Україні не вироб-

лено систематизований підхід до оцінювання його якості.

Розроблена авторами методика визначення теплотворної здатності ПГ як визначального показника його якості як джерела енергії з урахуванням вологості газу та наявності у його складі негорючих компонентів дозволяє реально визначити енергетичну цінність споживаного газу.

Експериментальні дослідження проб ПГ підтвердили справедливість теоретичних засад розробленої авторами методики оцінювання його якості як джерела енергії та можливість її використання у газовій промисловості України. ■

ЛІТЕРАТУРА

- Гордієнко А. І. До питання переходу на облік природного газу як енергоносія / Гордієнко А. І., Богословець І. Г., Чуб М. В. // Нафта і газова промисловість — 2001. — № 3. — С. 42—43.
- Теоретичні та практичні задачі кваліметрії природного газу / [Стадник Б. І., Мотало А. В., Мотало В. П., Петровська Л. Є.] // Вимірювальна техніка та метрологія — 2005. — Вип. 65. — С. 81—86.
- Козій В. М. Якість газу родовищ України / Козій В. М., Лур'є А. І., Рубанова І. А. // Питання розвитку газової промисловості України: Збірник наукових праць УкрНДГаз. — 2000. — Вип. 28. — С. 66—68.
- 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 УкрНДГаз. — 2008. — Вип. 36. — С. 173—177.
- International standard Natural gas — Quality designation: ISO 13686:1998. — [Уведений 01.01.83]. Женева: Міжнародна організація зі стандартизації, 1983. — 49 с.
- Газы горючие для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия: ГОСТ 5542—87. — [Дата введения 01.01.88]. — М.: Издательство стандартов, 1987. — 4 с. — (Государственный стандарт Союза ССР).
- Гази горючі природні, що подаються в магістральні газопроводи. Технічні умови: ТУ У 320.00158764.007—95. — [Чинні від 1996-01-01]. — К.: Держстандарт України, 1995. — 9 с. — (Технічні умови).
- Фомін В. Н. Кваліметрія. Управление качеством. Сертифікація: Учебное пособие / Фомін В. Н. — М.: Ось-89, 2002. — 384 с.
- Якість продукції. Оцінювання якості. Терміни та визначення: ДСТУ 2925—94. — [Чинний від 1996-01-01]. — К.: Держстандарт України, 1995. — 27 с. — (Державний стандарт України).
- Газ природний. Методы расчета физических свойств. Общие положения: ГОСТ 30319.0—96. — [Дата введения 2000.01.01]. — Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. — 7 с. — (Межгосударственный стандарт).
- 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).
- Газы горючие природные. Хроматографический метод определения компонентного состава: ГОСТ 23781-87. — [Дата введения 01.07.88]. — М.: Издательство стандартов, 1988. — 22 с. — (Государственный стандарт Союза ССР).
- Мотало А. В. Методи і засоби гігрометрії природного газу / Мотало А. В., Мотало В. П. // Вимірювальна техніка та метрологія. — 2006. — Вип. 66. — С. 210—219.
- Газы. Пикнометрический метод определения плотности: ГОСТ 17310—86. — [Дата введения 01.07.87]. — М.: Издательство стандартов, 1987. — 19 с. — (Государственный стандарт Союза ССР).
- Мотало А. В. Оцінювання якості природного газу за його теплотворною здатністю / Мотало А. В. // Вимірювальна техніка та метрологія. — 2007. — Вип. 67. — С. 92—100.
- Газы горючие природные. Методы определения содержания водяных паров и точки росы влаги: ГОСТ 20060—83. — [Дата введения 01.07.84]. — М.: Издательство стандартов, 1983. — 16 с. — (Государственный стандарт Союза ССР).
- Алексеев Г. Н. Общий теплотехника: Учебное пособие / Алексеев Г. Н. — М.: Высшая школа, 1980. — 552 с.
- Щетинин Е. С. Физика горения газов / Щетинин Е. С. — М.: Изд-во «Наука», 1965. — 740 с.