

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРАКТИЧНІ ЗАДАЧІ КВАЛІМЕТРІЇ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

© Богдан Стадник^{1,3}, Андрій Мотало², Василь Мотало¹, Іванна Петровська², 2005

¹ Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,
вул. С.Бандери, 12, Львів, 79013, Україна;

² ГПУ “Львівгазвидобування”,

вул. Рубчака, 27, Львів, 79026, Україна

³ Ряшівська політехніка, Ряшів, Польща

Описано і проаналізовано сучасний стан оцінювання і нормування показників якості природного газу. Запропонована систематизація показників якості природного газу залежно від його фізико-хімічних властивостей. Сформульовані актуальні задачі кваліметрії природного газу.

Описано и проанализировано современное состояние оценивания и нормирования показателей качества природного газа. Предложена систематизация показателей качества природного газа в зависимости от его физико-химических свойств. Сформулированы актуальные задачи кваліметрії природного газа.

In the article the present-day state of evaluation and normalization of natural gas quality parameters is described and analyzed. A systematization of natural gas quality parameters in dependence of it's physical and chemical properties is proposed. The actual tasks of natural gas qualimetry are formulated.

1. Вступ. В умовах глобалізації світового ринку проблема якості продукції, зокрема, стратегічної, стає все більш актуальною, оскільки лише високоякісна продукція може бути конкурентоспроможною. Природний газ (ПГ), який є високоенергетичною та хімічно цінною сировиною, безперечно, належить до стратегічних видів продукції. Це зумовило широке використання його як в побуті, так і в багатьох галузях промисловості, що приводить до постійного збільшення споживання ПГ та зростання цін на нього на світовому ринку.

Енергетична та хімічна цінність ПГ пояснює велику увагу спеціалістів різних профілів до нього як до об'єкта дослідження. Однак слід зазначити: якщо таких актуальних питань, як вимірювання витрати ПГ та його обліку, стосується багато робіт [1;2], то питання вимірювання якості ПГ нині практично не досліджується, хоч воно є надзвичайно актуальним. У чинних в Україні стандартах та інших нормативно-технічних документах (НТД) стосовно видобування, транспортування та споживання ПГ нормовано багато його фізико-хімічних показників, однак комплексні показники якості ПГ відповідно до потреб споживачів різного профілю, наприклад, комунальників чи працівників хімічної промисловості, відсутні.

Відповідно до ДСТУ 2925–94 [3] *якість продукції* – це сукупність характеристик продукції, які стосуються її здатності задовольняти встановлені і

передбачені потреби. Для практичного оцінювання якості продукції користуються *показниками якості*, які є кількісними оцінками однієї чи декількох властивостей продукції, що характеризують її якість.

Метою статті є аналіз сучасного стану оцінювання та нормування показників якості ПГ і формулювання на його основі актуальних задач, пов'язаних з вимірюванням показників якості ПГ, тобто задач *кваліметрії природного газу*.

2. Основні завдання досліджень. Ефективне розв'язання задач кваліметрії ПГ, як і кваліметрії взагалі, доцільно здійснювати на трьох рівнях: теоретичному, практичному та законодавчому [4].

Основними *теоретичними задачами* кваліметрії ПГ доцільно вважати такі:

- встановлення взаємозалежностей між фізико-хімічними властивостями та показниками якості ПГ;
- обґрунтування вибору, встановлення складу та систематизація показників якості ПГ;
- встановлення вимог до точності визначення показників якості ПГ.

До *практичних задач* кваліметрії ПГ належать:

- розроблення методів вимірювань показників якості ПГ відповідно до необхідної точності;
- вибір засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), необхідних для реалізації розроблених методів вимірювань показників якості ПГ;

- виконання необхідних вимірювань та визначення кількісних оцінок показників якості ПГ;

- визначення комплексних показників якості ПГ залежно від групи показників та потреб споживачів.

На законодавчому рівні треба розв'язати такі задачі:

- розроблення та впровадження необхідних нормативно-технічних документів (НТД) і стандартів для регламентації визначених показників якості ПГ;

- гармонізацію Державних стандартів України, які регламентують розв'язання поставлених вище задач, з відповідними Міжнародними стандартами.

3. Аналіз сучасного стану нормування фізико-хімічних показників природного газу. Вимоги до різних характеристик ПГ, як і інших видів продукції, регламентують відповідні стандарти та інші НТД, які чинні в Україні. Зокрема, за фізико-хімічними показниками природні гази, які призначені як сировина і паливо для промислового та комунального використання, і які подають в магістральні газопроводи, повинні відповідати вимогам і нормам, наведеним в табл.1, відповідно до ГОСТу 5542–87 [5] та ТУУ 320.001.58764.007–95 [6].

4. Систематизація показників якості природного газу. ПГ, як і будь-яка інша продукція, має певні властивості. *Властивістю продукції* називають її об'єктивну

особливість, яка може проявлятися при розробленні, виготовленні, експлуатації або споживанні продукції [3]. Предметом нашого розгляду будуть *показники якості* ПГ, які є кількісними оцінками одної чи декількох його властивостей при використанні ПГ як сировини в паливно-енергетичній та хімічній галузях промисловості.

Під час систематизації показників якості ПГ відповідно до концепції кваліметрії [17] були розв'язані такі задачі:

- обґрунтовано вибір і встановлена номенклатура показників якості ПГ;

- встановлені залежності між показниками якості та властивостями ПГ, що характеризуються;

- зроблена класифікація показників якості ПГ, тобто встановлені групи показників якості та їх склад залежно від характеру розв'язуваних задач.

Поставлені задачі розв'язані на основі аналізу газу (газової суміші) як термодинамічної системи, термодинамічний стан якої визначається взаємодією всіх її властивостей. Термодинамічні властивості ПГ поділяють на термічні та калориметричні [18]. Для аналізу взято, насамперед, основні *термічні властивості* газу, до яких належать тиск, температура, об'єм, а також ізотермічний фактор стиснення. Також аналізувалися *калориметричні властивості* газу, які безпосередньо впливають на його енергоємність.

Таблиця 1

Основні фізико-хімічні показники природних газів

№ з/п	Показник, умови визначення та розмірність	Нормовані значення показника	НТД, за яким визначають значення показника
1	Теплота згоряння нижча при температурі 20 °С і тиску 101,325 кПа, МДж/м ³ (ккал/м ³), не менше ніж	31,8 (7600)	ГОСТ 22667–82 [7], ГОСТ 27193–86 [8], ГОСТ 10062–75 [9]
2	Діапазон значень числа Воббе вищого, МДж/м ³ (ккал/м ³)	41,2 – 54,5 (9850 – 13000)	ГОСТ 22667–82 [7]
3	Допустиме відхилення числа Воббе від номінального значення, %, не більше ніж	±5	ГОСТ 22667–82 [7]
4	Масова концентрація сірководню, г/м ³ , не більше за	0,02	ГОСТ 22387.2–83 [10]
5	Масова концентрація меркаптанової сірки, г/м ³ , не більше за	0,036	ГОСТ 22387.3–77 [11]
6	Об'ємна частка кисню, %, не більше ніж	1,0	ГОСТ 23781–87 [12]
7	Маса механічних домішок в 1 м ³ , г, не більше ніж	0,001	ГОСТ 22387.4–77 [13]
8	Інтенсивність запаху газу при об'ємній частці 1% в повітрі, бал., не менше за	3	ГОСТ 22387.5–77 [14]
9	Точка роси газу за вологою при тиску 4,0 МПа, °С, не вища за • з 1 травня по 30 вересня • з 1 жовтня по 30 квітня	–3 –5	ТУ У 320.001.58764.007–95[6]; ГОСТ 20060–83 [15]
10	Точка роси газу по вуглеводнях, °С, не вища за	0	ТУ У 320.001.58764.007–95[6]; ГОСТ 20061–94 [16]

Вибір складу показників якості ПГ і встановлення залежностей між показниками якості та фізико-хімічними властивостями газу здійснено, насамперед, на підставі аналізу *рівняння стану неідеального газу*, записане у вірйальній формі, тобто рівняння, яке встановлює функціональну залежність між його основними термодинамічними характеристиками – тиском, температурою та питомим об’ємом в стані рівноваги [18; 19]:

$$\frac{p\vartheta}{R_f T} = 1 + \frac{B(T)}{R_f T} p + \frac{C(T) - B^2(T)}{(R_f T)^2} p^2 + \dots, \quad (1)$$

де p – тиск, Па; $\vartheta = V/m$ – питомий об’єм, м³/кг; V – об’єм, м³; m – маса, кг; $R_f = R/M$ – індивідуальна газова стала певного газу, Дж/(кг·К); R – універсальна газова стала ($R = 8,31441 \pm 0,00026$ Дж/(моль·К)); M – молярна маса газу, кг/моль; T – абсолютна температура, К; $B(T)$, м³/кг та $C(T)$, м⁶/кг² – перший та другий вірйальні коефіцієнти.

Під час встановлення номенклатури показників якості ПГ насамперед було проаналізовано ті його властивості, які входять до складу якості газу і забезпечують можливість оцінювання рівня його якості, зокрема, під час *транспортування, обліку та використання (споживання)* газу. Під час аналізу враховано призначення та умови використання ПГ, потреби споживачів та вимоги до показників якості, внаслідок чого було встановлено такі *групи показників якості* ПГ:

- показники призначення;
- показники технологічності;
- показники транспортабельності;
- екологічні показники;
- показники безпеки.

Виконаємо детальніший аналіз кожної групи показників якості ПГ, які наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Класифікація показників якості природних газів

№ з/п	Групи показників якості	Показники якості	Умовне позначення та розмірність
1	Показники призначення	<p><i>a) показники функціональної і технічної ефективності ПГ:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • питома теплота згоряння вища; • питома теплота згоряння нижча; • число Воббе; • густина; • відносна густина; • відносна вологість; • концентрація вуглекислого газу; • концентрація азоту; <p><i>a) показники складу і структури ПГ:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • молярна маса газу; • компонентний склад газової суміші; • об’ємна частка і-го компонента газової суміші; • молярна частка і-го компонента газової суміші; 	H_B , МДж/м ³ (ккал/м ³) H_H , МДж/м ³ (ккал/м ³) W , МДж/м ³ (ккал/м ³) ρ , кг/м ³ d φ , % C_{CO_2} , % C_{N_2} , % M , кг/моль – v_i , % K_i
2	Показники технологічності	<ul style="list-style-type: none"> • коефіцієнт стисливості; • фактор стисливості; • показник адіабати; • концентрація вуглекислого газу; • концентрація азоту; • динамічна в’язкість; • густина; • відносна густина; • маса механічних домішок в 1 м³; • швидкість поширення ультразвуку 	K Z χ C_{CO_2} , % C_{N_2} , % μ , мкПа · с ρ , кг/м ³ d $m_{ом}$, г u , м/с
3	Показники транспортабельності	<ul style="list-style-type: none"> • фактор стисливості; • масова концентрація сірководню; • масова концентрація меркаптанової сірки; • точка роси газу за вологою (вологість газу); • точка роси газу за вуглеводнями; • маса механічних домішок в 1 м³ 	Z $n_{св}$, г/м ³ $n_{мс}$, г/м ³ t_p , °С $t_{в}$, °С $m_{ом}$, г
4	Екологічні показники	<ul style="list-style-type: none"> • число Воббе; • масова концентрація сірководню; • масова концентрація меркаптанової сірки 	W , МДж/м ³ (ккал/м ³) $n_{св}$, г/м ³ $n_{мс}$, г/м ³
5	Показники безпеки	<ul style="list-style-type: none"> • об’ємна частка кисню; • інтенсивність запаху; • маса механічних домішок в 1 м³ 	v_k , % ζ , бал. $m_{ом}$, г

4.1. Показники призначення. До цієї групи належать показники якості, які визначають призначення ПГ і зумовлюють галузь його використання. Показники призначення розділені на дві підгрупи: показники функціональної і технічної ефективності ПГ та показники складу і структури ПГ.

Показники функціональної і технічної ефективності ПГ характеризують, насамперед, його теплотворну здатність і вартість в паливно-енергетичному комплексі. Найважливішими з них є питома об'ємна теплота згоряння, число Воббе, густина і вологість газу, а також вміст в газовій суміші вуглекислого газу та азоту.

Питома об'ємна теплота згоряння H або теплотворна здатність газу – це кількість тепла, яке виділяється під час повного згоряння газу в повітрі при сталому тиску p_{zg} і сталій температурі T_{zg} , віднесеного до об'єму сухого газу, визначеного за стандартних умов, тобто при тиску $p_C = 0,101325$ МПа і температурі $T_C = 293, 15$ К [20]. Розрізняють нижчу та вищу питому теплоту згоряння. Нижчу питому теплоту згоряння H_H визначають після повної конденсації водяної пари, яка міститься в газовій суміші, тобто після висушування газу, а вищу питому теплоту згоряння H_B – за наявності водяної пари в газовій суміші.

Цей показник якості є особливо важливим для комунально-побутової сфери споживання ПГ. Зокрема, оцінюючи ПГ як енергоносії, визначають його енергоємність E як добуток об'єму газу V на його нижчу питому теплоту згоряння H_H [21]:

$$E = VH_H. \quad (2)$$

Однак не враховується те, що навіть після осушування ПГ не повністю вільний від вологи [22], тобто визначена за (2) енергоємність газу E не є його реальною енергоємністю.

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

Показники складу і структури ПГ характеризують компонентний склад газової суміші, об'ємну та молярну частку кожного компонента і є важливими при використанні ПГ як сировини в хімічній промисловості.

4.2. Показники технологічності. Показники цієї групи характеризують ті властивості ПГ, які впливають на умови його обліку, використання та збері-

гання. Такими показниками є фактор стисливості, коефіцієнт стисливості, показник адиабати, динамічна в'язкість та густина газу, а також швидкість поширення звуку в ньому.

Фактор стисливості Z , який визначають як

$$Z = p\vartheta/R_T T \quad (3)$$

є термодинамічною характеристикою газового середовища. Зміну фактора стисливості газу залежно від його температури і тиску визначають за допомогою (1), обмежившись першими двома членами розкладу:

$$Z = 1 + \frac{B(T)}{R_T T} p. \quad (4)$$

Для ідеального газу $Z = 1$. Фактор стисливості газу Z враховують під час проектування та експлуатації газотранспортних магістралей, зокрема, для розрахунків розподілу тиску газу по довжині похилого газопроводу [23].

Коефіцієнт стисливості K газу (або суміші газів) – це відношення фактора стисливості Z цього газу в робочих умовах до його фактора стисливості Z_C за стандартних умов, тобто за тиску p_C і температури T_C :

$$K = Z / Z_C. \quad (5)$$

Коефіцієнт стисливості газу K , а також вміст в газовій суміші вуглекислого газу та азоту враховують в системах вимірювання витрати ПГ [24; 25].

Показник адиабати (ізоентропи), який дорівнює $\chi = C_p/C_v$ (де C_p та C_v – молярні теплоємності газу відповідно за сталого тиску та сталого об'єму), є термодинамічною характеристикою газового середовища (газу чи суміші газів), яка відображає процес без теплообміну газового середовища із довкіллям. Показник адиабати також враховують в системах вимірювання витрати газу методом змінного перепаду тиску при визначенні поправного множника ε на зміну густини ПГ за рахунок його розширення на пристрої звууження потоку [26].

Динамічна в'язкість μ є реологічною характеристикою газового середовища, яка відображає його опір протіканню під дією зовнішніх сил, тобто характеризує внутрішню тертя в газовому середовищі. Кількісно динамічну в'язкість визначають як дотичну силу, яка повинна бути прикладена до одиниці площі шару газу, що зсувається, необхідну для підтримання в цьому шарі протікання зі сталою швидкістю відносного зсуву, яка дорівнює одиниці.

4.3. Показники транспортабельності. До цієї групи належать показники якості ПГ, які характе-

ризують його пристосованість до транспортування, зокрема, вплив газу на магістралі, якими він передається до споживачів. Важливість показників цієї групи визначається тим, що витрати на транспортування газу істотно перевищують витрати на його видобування. Такими показниками є *масова концентрація сірководню та меркаптанової сірки, точка роси газу за вологою (вологість газу), точка роси газу за вуглеводнями і наявність механічних домішок*. Наявність в газовій суміші *сірководню та меркаптанової сірки* спричиняє розвиток корозії внутрішньої поверхні газопроводів, арматури та апаратів, що призводить до їх зношування. *Наявність вологи* в газі викликає утворення кристалогідратів та спричиняє розвиток процесів корозії газопроводів, порушує роботу автоматики, особливо взимку. *Наявність в газі крапельної вологи та вуглеводнів* не допускається. *Механічні домішки*, зокрема, мінеральні частинки смоли, продукти корозії, металеві частинки тощо, також призводять до передчасного зношування газопроводів та компресорних агрегатів, засмічування контрольно-вимірювальних приладів і, відповідно, зниження надійності роботи газотранспортних систем.

4.4. Екологічні показники. Показники цієї групи характеризують шкідливий вплив ПГ на довкілля, який проявляється, зокрема, у шкідливих викидах в атмосферу під час його транспортування, зберігання та споживання. Такими показниками є *число Воббе*, яке, як зазначено в п. 4.1., визначає повноту згоряння газу, тобто згоряння без утворення сажі і смол та з мінімальним виділенням оксиду вуглецю, та *масову концентрацію сірководню і меркаптанової сірки*, наявність яких в газовій суміші призводить до забруднення приміщень токсичними продуктами при її спалюванні.

4.5. Показники безпеки. До цієї групи належать показники якості ПГ, які характеризують безпеку споживачів та обслуговуючого персоналу при добуванні, транспортуванні, зберіганні та споживанні газу. Такими показниками є *об'ємна частка кисню, наявність механічних домішок та інтенсивність запаху*. *Кисень* в газових родовищах зазвичай відсутній, однак він може бути внесеним в газопровід із атмосфери при недостатньому продуванні газопроводів, при введенні їх в дію після будівництва або ремонтно-відновлювальних робіт, що становить небезпеку, оскільки наявність кисню в горючому газі призводить до створення пожежо- та вибухонебезпечних сумішей. *Інтенсивність запаху газу* є важливою умовою при використанні його для комунально-побутових потреб.

Небезпека зумовлена можливістю утворення вибухонебезпечних сумішей при потрапленні газу в повітряне середовище приміщень. Для своєчасного виявлення газу в атмосфері йому надають специфічний запах одоризацією меркаптановими сполуками.

5. Основні результати виконаних досліджень.

Дослідженнями встановлено, що чинна система оцінювання якості ПГ не забезпечує повністю потреб споживачів газу різного профілю, наприклад, комунальників чи працівників хімічної промисловості, не дає можливості визначення комплексних показників якості природного газу залежно від сфер його використання і не відповідає сучасним вимогам до контролю якості продукції, зокрема вимогам ДСТУ ISO 9001-2001 [27]. У чинних стандартах та інших НТД, які регламентують вимоги до нормування основних фізико-хімічних показників природного газу, не охоплені всі показники якості ПГ, які відображені в табл. 2, а також недостатньо регламентовані вимоги до методів визначення цих показників та необхідної точності вимірювань, тобто вимоги до метрологічного забезпечення вимірювання якості ПГ. Запропонована систематизація показників якості ПГ за групами залежно від розв'язуваних задач дає можливість комплексного оцінювання якості газу, а також відкриває шляхи до розв'язання теоретичних і практичних задач кваліметрії природного газу, сформульованих в п.2, зокрема, до встановлення вимог щодо точності визначення показників якості ПГ та вибору методів і необхідних засобів вимірювальної техніки для їх вимірювання.

6. Висновки.

1. Запропонована систематизація показників якості ПГ дає змогу визначити комплексні показники якості в окремих групах та розробити єдині принципи оцінювання якості газу і, тим самим, повніше враховувати потреби споживачів газу різного профілю.

2. Перехід до комплексної системи оцінювання якості ПГ потребує створення нової законодавчої бази для регламентації вимог до показників якості природного газу.

3. Ефективне впровадження комплексної системи оцінювання якості ПГ потребує відповідного вдосконалення метрологічного забезпечення вимірювань показників якості газу та створення нових нормативно-технічних документів, які регламентують точність вимірювань показників якості природного газу.

1. Пістун С.П. *Облік та економія природного газу // Нафтова і газова промисловість, 2000. – №2. – С. 43–47.*
Гордієнко А.І., Коломеев В.М., Фролов А.Ф. *Стан*

вимірювання кількості та параметрів якості природного газу у системі ДК "Укртрансгаз" // *Нафтова і газова промисловість*, 2000. – №5. – С. 44–47. 3. ДСТУ 2925- 94. *Якість продукції. Оцінювання якості. Терміни та визначення*. 4. Шишкин И.Ф. *Теоретическая метрология: – М. 1991*. 5. ГОСТ 5542–87. *Газы горючие для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия*. 6. ТУ У 320.001.58764.007–95. *Газы горючі природні, що подаються в магістральні газопроводи. Технічні умови*. 7. ГОСТ 22667–82. *Газы горючие природные. Расчетный метод определения теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе*. 8. ГОСТ 27193–86. *Газы горючие природные. Метод определения теплоты сгорания водяным калори-метром*. 9. ГОСТ 10062–75. *Газы природные горючие. Метод определения удельной теплоты сгорания*. 10. ГОСТ 22387.2–83. *Газы горючие природные. Методы определения сероводорода и меркаптановой серы*. 11. ГОСТ 22387.3–77. *Газ для коммунально-бытового потребления. Метод определения содержания кислорода*. 12. ГОСТ 23781-87. *Газы горючие природные. Хроматографический метод определения компонентного состава*. 13. ГОСТ 22387.4–77. *Газ для коммунально-бытового потребления. Метод определения содержания смолы и пыли*. 14. ГОСТ 22387.5–77. *Газ для коммунально-бытового потребления. Метод определения интенсивности запаха*. 15. ГОСТ 20060–83. *Газы горючие природные. Методы определения содержания водяных паров точки росы влаги*. 16. ГОСТ 20061–94. *Газы горючие природные. Метод определения точки росы*

углеводородов. 17. Фомин В.Н. *Квалиметрия. Управление качеством. Сертификация: Учебное пособие*. – М. 2002. 18. Щильрайн Э.Э., Кессельман П.М. *Основы теории теплофизических свойств веществ*. – М. 1977. 19. Рид Д., Праусниц Дж., Шервурд Т. *Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие*. – Л. 1982. 20. ГОСТ 30319.0–96. *Газ природный. Методы расчета физических свойств. Общие положения*. 21. . Гордієнко А.І., Богомолець., Чуб М.В. *До питання переходу на облік природного газу як енергоносія // Нафтова і газова промисловість*, 2001. – №3. – С. 42–43. 22. Крук І., Крук О. *Оцінка похибки при визначенні коефіцієнта стискуваності вологого природного газу // Метрологія та вимірювальна техніка*, 2002. – Вип.. 60. – С. 111–114. 23. Лесовой Л., Близнюк Л. *Розрахунок розподілу тиску природного газу по довжині похилого газопроводу з врахуванням фактора стискуваності // Вісник НУ "Львівська політехніка"*, 2002. – №452.– С.198–203. 24. Пистун Е.П., Лессовой Л.В. *О точности определения количества природного газа в магистральных газопроводах // Контрольно-измерительная техника*, 1982. – Вып. 42. – С. 35–38. 25. Пистун Е.П., Матіко Ф.Д. *Методика розрахунку коефіцієнта стискуваності природного газу з метою його обліку // Нафтова і газова промисловість*, 2001. – №1. – С. 53–54. 26. Матіко Ф. *Визначення показника адиабати природного газу для задач його обліку на автомобільних газонаповнювальних станціях // Вісник НУ "Львівська політехніка"*, 2000. – №404.– С.86–89. 27. ДСТУ ISO 9001–2001. *Системи управління якістю. Вимоги*.