

УДК 681.121

МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОВІДДАЧІ ТЕРМОЧУТЛИВОГО ПАРЦІАЛЬНОГО ВИТРАТОМІРА ПРИ ОЦІНЦІ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

В. В. Малісевич, О. Є. Середюк*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, e-mail: feivt@nung.edu.ua*

Обґрунтовано можливість визначення теплоти згоряння у процесі вимірювання його витрати з природного газу з використанням парціального витратоміра. Розглянута методологія експериментального визначення коефіцієнта тепловіддачі як інформативного параметра під час функціонування парціального витратоміра. Досліджений кореляційний зв'язок між коефіцієнтом тепловіддачі термочутливого датчика парціального витратоміра і теплою згорання природного газу. Здійснений метрологічний аналіз визначення коефіцієнта тепловіддачі термочутливого датчика парціального витратоміра і здійснена кількісна оцінка сумарних невизначеностей при його визначенні.

Ключові слова: природний газ, витрата, теплота згорання, коефіцієнт тепловіддачі, невизначеність.

Обоснована возможность определения теплоты сгорания природного газа при определении его расхода с использованием парциального расходомера. Рассмотрена методология экспериментального определения коэффициента теплоотдачи как информативного параметра во время функционирования парциального расходомера. Исследована корреляционная связь между коэффициентом теплоотдачи термочувствительного датчика парциального расходомера и теплотой сгорания природного газа. Осуществлены метрологический анализ определения коэффициента теплоотдачи парциального расходомера и осуществлена количественная оценка суммарных неопределенностей при его оценке.

Ключевые слова: природный газ, расход, теплота сгорания, коэффициент теплоотдачи, неопределенность.

The possibility of energy value determination of natural gas flow rate with the use of the partial flowmeter is proved. The methodology of experimental determination of the heat transfer coefficient as an informing parameter during functioning of partial flowmeter is considered. The correlation relationship between the heat transfer coefficient of thermal sensor of the partial flowmeter and calorific value of natural gas is investigated. The metrology model of determination of the heat transfer coefficient of the partial flowmeter is developed and quantitative estimation of summary uncertainty at his finding is carried out.

Keywords: natural gas, flow rate, calorific value, heat transfer coefficient, uncertainty.

Вступ

У зв'язку з подорожанням енергоносіїв питання раціонального використання природного газу останнім часом стає дедалі актуальнішим. Насамперед воно стосується точності визначення об'єму чи об'ємної витрати спожитого палива при здійсненні його обліку лічильниками та витратомірами. З іншого боку сучасний підхід до використання природного газу спрямований на здійснення його обліку з урахуванням енергетичної цінності [1, 2] та ведення розрахунків за спожитий газ не тільки по об'єму, а й за кількістю енергії, що в ньому

акумульована [3]. Використовуючи такий підхід до обліку витрати природного газу, можна не лише обґрунтувати рівень установленної на нього ціни, але і сприяти збереженню енергоресурсів країни.

Аналіз літературних джерел

Аналіз літературних джерел показав, що парціальний витратомір дозволяє здійснювати вимірювання витрати, використовуючи як інформативний параметр загальний потік газу [4]. Одним із видів такого типу витратомірів може бути використання трубки Піто, що

вимірює локальну швидкість потоку робочого середовища в одній точці поперечного перетину трубопроводу [5].

Проте, на даний час облік природного газу здійснюють переважно за допомогою роторних чи турбінних лічильників або систем із звужувальними пристроями з приведенням результатів вимірювання до стандартних умов. Теплоту згорання палива при цьому визначають калориметричним методом або розрахунковим шляхом за допомогою потокових хроматографів. Однак ці методи потребують відносно тривалого часу для вимірювання і не дозволяють проводити розрахунок теплоти згорання природного газу одночасно з вимірюванням його об'єму чи витрати.

Визначати компонентний склад і теплоту згорання природного газу можна, використовуючи інфрачервоний газоаналізатор [6] з трьома вимірювальними кюветами. Проте він не передбачає вимірювання витрати робочого середовища, а для визначення компонентного складу газу йому потрібно у дві еталонні кювети закачати відповідний компонент газу, за яким буде проводитися дослідження природного газу.

Відома також установка для визначення теплоти згорання природного газу [7], яка функціонує на основі швидкості поширення ультразвукових коливань у природному газі і не передбачає вимірювання витрати.

Для вимірювання витрати природного газу з одночасним визначенням його теплотворної здатності авторами запропоновано використовувати парціальний витратомір [8], математична модель якого дозволяє у процесі його функціонування визначити коефіцієнт тепловіддачі термочутливого давача робочому середовищу. Визначення теплоти згорання природного газу одночасно з вимірюванням його витрати стає можливим завдяки існуванню кореляційного зв'язку між нею та коефіцієнтом тепловіддачі.

Робота [9] присвячена дослідженню метрологічних характеристик термоанемометричних вимірювальних перетворювачів масової витрати робочого середовища. Однак вони стосуються тільки вимірювання витрати робочого середовища, а не його якісних параметрів з метою визначення енергетичної цінності природного газу.

Метою даної роботи є розробка метрологічний аналіз визначення коефіцієнта тепловіддачі парціального витратоміра з термочутливим давачем.

Парціальний витратомір (рис. 1) у своєму

складі містить розміщену в трубопроводі 1 з робочим середовищем 2 гідродинамічну трубку 3 з приймачами повного 4 та статичного 5 тиску, термочутливий давач 6, який під'єднано до блоку вимірювання температури 8 і блоку визначення теплопровідності робочого середовища 10. Визначення витрати газу здійснюється обчислювальним блоком 9 за інформацією про локальну швидкість газу, визначену за перепадом тиску блоком 7. При цьому облік природного газу здійснюється з врахуванням його теплоти згорання за інформацією з блоку визначення теплопровідності, який обчислює її з урахуванням локальної швидкості природного газу.

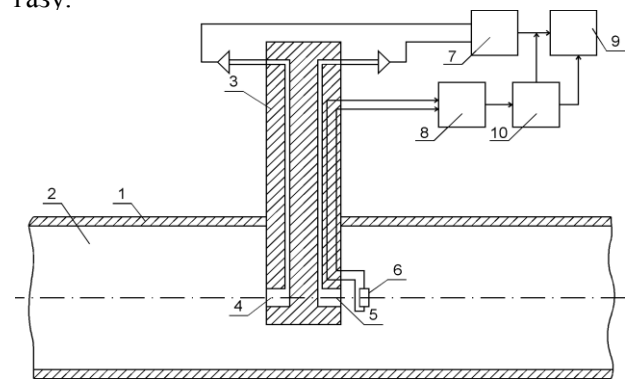


Рисунок 1 – Схема парціального витратоміра

Алгоритм функціонування парціального витратоміра полягає у застосуванні теплового балансу між термочутливим давачем (металевою дротиною) і робочим середовищем. Кількість тепла Q_D , яку віддає термочутливий давач при проходженні через нього електричного струму I є такою:

$$Q_D = I^2 R_D, \quad (1)$$

де I – сила електричного струму, що проходить через металеву дротину; R_D – електричний опір металеві дротини при робочих умовах парціального витратоміра.

Кількість тепла Q_{PC} , яке переноситься за одиницю часу від металеві дротини довжиною l_D з рівномірно розподіленою температурою до робочого середовища, рівна [4]:

$$Q_{PC} = \alpha \pi d_D l_D (T_D - T_G), \quad (2)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі термочутливого давача робочому середовищу; l_D , d_D – довжина і діаметр металеві дротини за стандартних умов відповідно; T_D , T_G – температура металеві дротини і температура природного газу за

робочих умов відповідно.

Для визначення швидкості потоку природного газу n в парціальному витратомірі використана гідродинамічна трубка Піто, функціонування якої можна описати відомою формулою [4]:

$$n = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_{\Gamma}}}, \quad (3)$$

де Δp – різниця між динамічним і статичним тиском на трубці Піто; ρ_{Γ} – густина природного газу.

Для того, щоб теоретично обґрунтувати можливість використання коефіцієнта тепловіддачі як інформативного параметра парціального витратоміра для визначення енергетичної цінності природного газу спочатку зупинимося на теоретичних засадах. З цією метою спочатку запишемо цей коефіцієнт, використовуючи критерій подібності Нуссельта Nu [4]:

$$\bar{\alpha} = \frac{Nu \cdot \lambda_{\Gamma}}{d_{\Gamma}}, \quad (4)$$

де λ_{Γ} – коефіцієнт теплопровідності природного газу.

З врахуванням того, що процес теплообміну металеві дротини з газовим середовищем відбувається шляхом вимушеної конвекції, то критерій подібності Нуссельта [10] можна подати у вигляді:

$$Nu = 0,42 \left(\frac{c_p \mu_{\Gamma}}{\lambda_{\Gamma}} \right)^{0,2} + 0,57 \left(\frac{c_p \mu_{\Gamma}}{\lambda_{\Gamma}} \right)^{0,33} \left(\frac{c_{\Gamma} n d_{\Gamma}}{\mu_{\Gamma}} \right)^{0,5}, \quad (5)$$

де c_p , μ_{Γ} , ρ_{Γ} – коефіцієнт теплоємності, динамічної в'язкості і густина природного газу при робочих умовах витратоміра відповідно; n – швидкість потоку робочого середовища.

Із аналізу (5) видно, що теплофізичні параметри c_p , λ_{Γ} , μ_{Γ} , ρ_{Γ} є змінними і залежать від компонентного складу природного газу, тому для їх дослідження використаємо методологію статистичного аналізу бази даних компонентного складу природного газу. Такий підхід дозволить емпіричним шляхом встановити кореляційний зв'язок між коефіцієнтом тепловіддачі α і теплотою згорання природного газу.

Використавши реальні дані складу природного газу, які були зафіксовані хімічною лабораторією ВАТ "Івано-франківськгаз" впродовж 2004-2006 рр., сформовано базу даних, яка містить відомості про компонентний склад, нижчу теплоту згорання та густину кожного із 97 різних складів природного газу за стандартних умов. В базу даних відібрані гази,

що у своєму складі містять метан об'ємною концентрацією 92,5...98,1 %, етан об'ємною концентрацією 0,6...3,3 %, пропан об'ємною концентрацією 0,2...1,5 %, азот об'ємною концентрацією 0,5...1,2 %, вуглекислий газ об'ємною концентрацією 0...0,9 %.

Для кожного складу природного газу був розрахований коефіцієнт теплопровідності за відомим алгоритмом [11]:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \lambda_i}{\sum_{j=1}^n y_j A_{ij}}, \quad (6)$$

де λ , λ_i – теплопровідність природного газу і його i -тих компонентів відповідно; y_i , y_j – мольні долі i -их і j -их компонентів, яким відповідно присвоюються вказані індекси i і які розраховувалися відповідно до заданих об'ємних концентрацій газу.

Параметр A_{ij} у (6) розраховувався наступним чином [11]:

$$A_{ij} = \frac{1 + \lambda_i / \lambda_j^{1/2} M_i / M_j^{1/4}}{8 \cdot 1 + M_i / M_j^{1/2}}, \quad (7)$$

де M_i , M_j – молекулярна маса i -их та j -их компонентів.

Мольні долі компонентів розраховувалися відповідно до заданих об'ємних концентрацій газу за формулою [12]:

$$y_i = \frac{r_i / z_{ci}}{\sum_i r_i / z_{ci}}, \quad (8)$$

де r_i – об'ємна частка i -го компонента; z_{ci} – фактор стисливості i -го компонента газу за стандартних умов, який розраховується згідно з [12].

Числові значення теплопровідності λ_i компонентів природного газу визначалися згідно з [13] із застосуванням методу інтерполяції.

Коефіцієнт теплоємності для конкретного складу природного газу розраховувалася шляхом адитивності з урахуванням теплоємностей кожного із компонентів газу і їх об'ємних долей. Числові значення коефіцієнтів теплоємності кожного з компонентів взято з [13, 14].

Коефіцієнт динамічної в'язкості для різних складів природного газу розраховувався за відомим алгоритмом, наведеним в [12].

Далі за формулами (4)-(5) для кожного складу газу розраховувався коефіцієнт

тепловіддачі α . Оскільки в (5) входить швидкість робочого середовища і діаметр дротини, то швидкість потоку приймалася рівною 1 м/с, а діаметр металевої дротини – 30 мкм. При дослідженнях для кожного складу газу розраховувалася нижча теплота згорання [12]. Отримані значення коефіцієнта α так як і значення нижчої теплоти згорання газу H є різними і в даному випадку визначаються тільки компонентним складом природного газу, що дає змогу встановити регресійну залежність між цими параметрами. На рис. 3 наведено отриману графічну залежність між нижчою теплотою згорання природного газу H і коефіцієнтом тепловіддачі α .

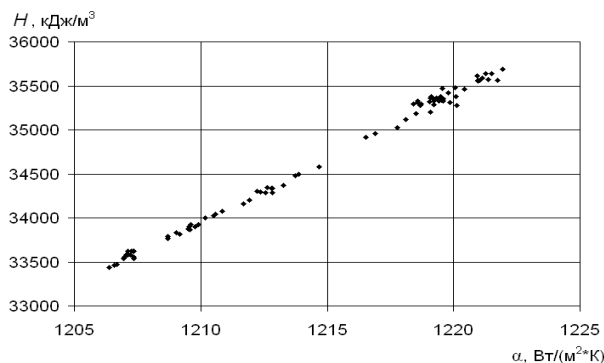


Рисунок 3 – Графічна інтерпретація кореляційної залежності нижчої теплоти згорання H природного газу від коефіцієнта тепловіддачі α

З аналізу рис. 3 видно практично лінійну залежність нижчої теплоти згорання H від коефіцієнта тепловіддачі α за стандартних умов, що обґрунтовує можливість його використання як інформативного параметра при функціонуванні парціального витратоміра.

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі α , враховуючи (1)-(2), запишемо, що

$$\bar{\alpha} = \frac{I^2 R_d}{pd_d l_d T_d - T_r} \quad (9)$$

Оскільки температура T_d металевої дротини в процесі роботи витратоміра не піддається вимірюванню, то розрахуємо її на підставі фізичних параметрів дротини і відомого температурного коефіцієнту електричного опору за відомим законом:

$$T_d = \frac{R_d + R_c \left(T_c - 1 \right)}{k R_c} \quad (10)$$

де R_c – електричний опір дротини за стандартних умов; k – температурний

коефіцієнт електричного опору; T_c – температура за стандартних умов.

Електричний опір дротини R_c визначимо за відомою формулою:

$$R_c = r \cdot \frac{4l_d}{pd_d^2}, \quad (11)$$

де r – питомий електричний опір матеріалу дротини.

Враховуючи те, що коефіцієнт тепловіддачі визначається за формулою (9) за робочих умов функціонування парціального витратоміра, його значення необхідно привести до стандартних умов. Для цього спочатку треба встановити залежність коефіцієнта α від тиску та температури природного газу. На основі набору розрахованих значень коефіцієнта тепловіддачі при робочих тисках 0,1...2,0 МПа і температурах 0...30°C (табл. 1) виведено апроксимаційну залежність, яка дозволила математично пов'язати коефіцієнт тепловіддачі з тиском і температурою робочого середовища при швидкості потоку 1 м/с та за умови використання металевої дротини діаметром 30 мкм у термочутливому давачі:

$$\bar{\alpha}(p, T) = 1,54T_r + 1463,8p_r + 1367,5 \quad (12)$$

Залежність (12) дає можливість визначати значення коефіцієнта тепловіддачі за різних робочих умов. Оскільки залежність на рис. 3 передбачає, що значення α є відомим при стандартних умовах, то необхідно записати алгоритм перерахунку α до стандартних умов.

Для цього на базі (12) запишемо співвідношення:

$$\frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_c} = \frac{1,54T_r + 1463,8p_r + 1367,5}{1,54T_c + 1463,8p_c + 1367,5} \quad (13)$$

де α_c – коефіцієнт тепловіддачі за стандартних умов; p_c і T_c – тиск та температура робочого середовища за стандартних умов.

Після підстановки у формулу (13) значень $p_c=0,1$ МПа і $T_c=20^\circ\text{C}$ отримаємо формулу для визначення α_c :

$$\bar{\alpha}_c = \frac{1544,68\alpha}{1,54T_r + 1463,8p_r + 1367,5} \quad (14)$$

Для побудови метрологічної моделі визначення коефіцієнта тепловіддачі парціального витратоміра необхідно враховувати похибки всіх складових, що входять в алгоритм (9) знаходження коефіцієнта тепловіддачі у процесі функціонування парціального витратоміра. З урахуванням (10)–(11) алгоритм (9) можна записати у такому вигляді:

$$\delta = \frac{I^2 R_d}{pd_d l_d \left(\frac{R_d + 4rl_d/pd_d^2 \cdot kT_C - 1}{4kr_l d_d/pd_d^2} - T_\Gamma \right)} \quad (15)$$

Проведемо метрологічний аналіз визначення коефіцієнта тепловіддачі, використовуючи концепцію невизначеності [15]. Запишемо алгоритм визначення сумарної невизначеності U_α визначення коефіцієнта тепловіддачі:

$$U_\delta = U_{\delta_0} + U_{\delta_{p\alpha}} + U_{\delta_{T\alpha}}, \quad (16)$$

де U_{δ_0} – основна невизначеність при знаходженні коефіцієнта α ; $U_{\delta_{p\alpha}}$ і $U_{\delta_{T\alpha}}$ – додаткові невизначеності від непостійності тиску та температури природного газу відповідно.

Для розрахунку основної невизначеності U_{δ_0} знаходження коефіцієнта α використаємо принцип незалежності похибки вимірювання параметрів у (15). Таким чином на базі алгоритму (15) і за умови припущення відсутності кореляційних зв'язків між значеннями його параметрів [15], запишемо

такий вираз для досліджуваної метрологічної моделі:

$$U_{\delta_0} = \sqrt{\left(\frac{\partial \delta}{\partial I} U_B(I) \right)^2 + \left(\frac{\partial \delta}{\partial R_d} U_B(R_d) \right)^2 + \left(\frac{\partial \delta}{\partial d_d} U_B(d_d) \right)^2 + \left(\frac{\partial \delta}{\partial l_d} U_B(l_d) \right)^2 + \left(\frac{\partial \delta}{\partial T_\Gamma} U_B(T_\Gamma) \right)^2}, \quad (17)$$

де $\partial \delta / \partial I$, $\partial \delta / \partial R_d$, $\partial \delta / \partial d_d$, $\partial \delta / \partial l_d$, $\partial \delta / \partial T_\Gamma$ – коефіцієнти впливу для розрахунку невизначеності параметрів I , R_d , d_d , l_d , T_Γ відповідно; $U_B(I)$, $U_B(R_d)$, $U_B(d_d)$, $U_B(l_d)$, $U_B(T_\Gamma)$ – стандартні невизначеності вимірювання параметрів I , R_d , d_d , l_d , T_Γ відповідно.

При цьому у формулі (17) невизначеності $U_B(r)$, $U_B(k)$, $U_B(T_C)$ і $U_B(\pi)$ не вказані внаслідок того, що питомий електричний опір матеріалу дротини (платини), температурний коефіцієнт електричного опору для платини, температура за стандартних умов є фізичними константами $r=11 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $k=3,9 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹, $T_C=293,15$ К і подаються у відповідній довідковій літературі.

Таблиця 1 – Числові значення коефіцієнта тепловіддачі δ при робочих тисках 0,1...2,0 МПа і температурах 0...30 °С

Температура, °С	Тиск, МПа				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0	1159,461	1483,127	1736,307	1954,297	2150,83
10	1182,79	1508,169	1761,777	1979,378	2174,26
20	1207,449	1534,143	1787,573	2003,642	2196,189
30	1232,419	1561,24	1815,833	2032,235	2224,567
	Тиск, МПа				
	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0	2331,494	2500,798	2661,406	2815,296	2963,501
10	2354,112	2521,588	2680,382	2831,556	2976,909
20	2372,316	2536,049	2691,122	2837,429	2977,323
30	2400,04	2562,468	2715,479	2860,43	2998,457
	Тиск, МПа				
	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
0	3098,359	3228,488	3354,58	3477,079	3596,564
10	3111,002	3240,305	3365,638	3487,331	3605,802
20	3110,412	3238,692	3362,872	3483,386	3600,652
30	3131,094	3258,86	3382,423	3502,265	3618,806
	Тиск, МПа				
	1,6	1,7	1,8	1,9	2
0	3687,459	3800,252	3910,742	4019,503	4126,372
10	3721,57	3834,763	3945,628	4054,641	4161,733
20	3715,116	3826,975	3936,476	4044,097	4149,769
30	3732,311	3843,154	3951,589	4058,053	4162,522

Зважаючи на те, що на стадії попередньої оцінки метрологічних характеристик парціального витратоміра практично неможливо обчислити кількісні характеристики невизначеності без конкретних числових даних, то задамося такими попередньо визначеними оцінками значень вхідних величин для робочих умов функціонування витратоміра: $I=0,2$ А, $R_D=2$ Ом, $d_D=30 \cdot 10^{-6}$ м, $l_D=0,01$ м, $T_G=30$ °С, $p_G=0,2$ МПа.

Спочатку визначимо всі невизначеності, які входять в (17). При цьому їх будемо обчислювати за типом В в силу неможливості застосування статистичних методів для їх оцінки.

Невизначеності вимірювання сили електричного струму I , температури природного газу T_G , електричного опору R_D , діаметра d_D та довжини l_D металеві дротини визначаються метрологічними характеристиками використаних вимірювальних приладів. Так для вимірювання електричного струму використовувався амперметр з границею основної похибки $\delta(I)=\pm 0,5$ %, для вимірювання електричного опору застосовувався омметр з границею основної похибки $\delta(R_D)=\pm 0,5$ %, діаметр металеві дротини вимірювали за допомогою мікроскопа з абсолютною похибкою $\Delta(d_D)=\pm 1 \cdot 10^{-6}$ м, довжину металеві дротини вимірювали за допомогою мікроскопа з абсолютною похибкою рівною $\Delta(l_D)=\pm 1 \cdot 10^{-5}$ м, температуру природного газу вимірювали за допомогою термометра з абсолютною похибкою $\Delta(T_G)=\pm 0,15$ К. З врахуванням нормального закону розподілу спостережень сили електричного струму, електричного опору, температури газу та довжини металеві дротини отримуємо [15], що

$$U_B(I) = \frac{2 \cdot d(I) \cdot I}{100 \cdot \sqrt{36}} = 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ А}, \quad (18)$$

$$U_B(R_D) = \frac{2 \cdot d(R_D) \cdot R_D}{100 \cdot \sqrt{36}} = 0,003 \text{ Ом}, \quad (19)$$

$$U_B(T_G) = \frac{2 \cdot \Delta(T_G)}{\sqrt{36}} = 0,05 \text{ К}. \quad (20)$$

Невизначеність вимірювання діаметра та довжини металеві дротини знайдена як стандартна невизначеність типу В з прийнятим трикутним законом розподілу результатів спостережень [15], який має місце при вимірюванні лінійних розмірів циліндричних об'єктів:

$$U_B(d_D) = \frac{2 \cdot \Delta(d_D)}{\sqrt{24}} = 4,08 \cdot 10^{-7} \text{ м}, \quad (21)$$

$$U_B(l_D) = \frac{2 \cdot \Delta(l_D)}{\sqrt{24}} = 4,08 \cdot 10^{-6} \text{ м}. \quad (22)$$

Для кількісної оцінки коефіцієнтів впливу, які входять у (17), знайдемо з використанням програмного пакету MathCad часткові похідні досліджуваного параметра α відносно параметрів, які формують його похибку. З врахуванням їх достатньо складного математичного запису подамо їхні кількісні оцінки за умови підставлення вище вказаних кількісних значень робочих умов функціонування витратоміра. В результаті було

отримано, що: $\frac{\partial \delta}{\partial I} = 13450,0 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{А}}$;

$$\frac{\partial \delta}{\partial R_D} = -2837,0 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Ом}};$$

$$\frac{\partial \delta}{\partial d_D} = -5,128 \cdot 10^8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}; \quad \frac{\partial \delta}{\partial l_D} = -5,675 \cdot 10^5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}};$$

$$\frac{\partial \delta}{\partial T_G} = 21,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^2}.$$

Таким чином, після підстановки у (17) розрахованих за формулами (18)-(22) значень стандартних невизначеностей і відповідних значень коефіцієнтів впливу отримаємо таке числове значення основної невизначеності для коефіцієнта тепловіддачі $U_{B\alpha}=23,783$ Вт/(м²·К).

Для визначення додаткових невизначеностей U_{Bp_G} і U_{BT_G} на базі алгоритму (14) запишемо:

$$U_{Bp_G} = \frac{\partial \delta_C}{\partial p_G} U_B p_G, \quad (23)$$

$$U_{BT_G} = \frac{\partial \delta_C}{\partial T_G} U_B T_G, \quad (24)$$

де $\frac{\partial \alpha_C}{\partial p_G}$, $\frac{\partial \alpha_C}{\partial T_G}$ – коефіцієнти впливу для розрахунку невизначеності параметрів p_G і T_G відповідно; $U_B(p_G)$, $U_B(T_G)$ – стандартні невизначеності вимірювання параметрів p_G і T_G відповідно.

Для вимірювання тиску природного газу використовувався перетворювач тиску з границею основної похибки $\delta(p_G)=\pm 0,1$ %. З врахуванням нормального закону розподілу результатів спостережень тиску отримаємо таке значення невизначеності [15]:

$$U_B p_G = \frac{2 \cdot d(p) \cdot p}{100 \cdot \sqrt{36}} = 6,7 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}. \quad (25)$$

Обчислимо коефіцієнти впливу для (23)–(24), знайшовши часткові похідні

досліджуваного параметра α_c . Далі підставимо в отримані формули визначені оцінки значень вхідних величин. При цьому числове значення δ візьмемо з табл. 1:

$$\frac{\partial_c}{\partial p_T} = \frac{-2261102,584}{1,54T_T + 1463,8p_T + 1367,5^2} = -1212,0 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{КПа}},$$

$$\frac{\partial_c}{\partial T_T} = \frac{-2378,81 \cdot \bar{\alpha}}{1,54T_T + 1463,8p_T + 1367,5^2} = -1,275 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}^2}.$$

Підставивши отримані значення у (23)–(24), отримаємо такі числові значення додаткових невизначеностей: $U_{Br\alpha_c} = -0,081204 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $U_{BT\alpha_c} = -0,06375 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Підставивши отримані значення основної та додаткових невизначеностей у (16) отримаємо числове значення сумарної невизначеності для коефіцієнта тепловіддачі $U_{\alpha_c} = 23,927954 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Зважаючи, що для вибраних значень оцінок параметрів $I=0,2 \text{ А}$, $R_{\bar{d}}=2 \text{ Ом}$, $d_{\bar{d}}=30 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $l_{\bar{d}}=0,01 \text{ м}$, $T_T=30 \text{ }^\circ\text{С}$, $p_T=0,2 \text{ МПа}$ згідно з (15) розрахункове значення коефіцієнта буде становити $\delta = 1345,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, отримуємо таке числове значення відносної сумарної невизначеності:

$$\delta U_{\alpha_c} = \frac{U_{\alpha_c}}{\delta} \cdot 100 = 1,78 \%. \quad (26)$$

Для обчислення розширеної невизначеності визначення коефіцієнта α необхідно результат згідно з (26) помножити на коефіцієнт охоплення k_0 для відповідної довірчої ймовірності. Приймаючи $k_0=2$ у відповідності до вибраної довірчої ймовірності $P=0,95$ [15], отримаємо $U_P(\alpha)=3,56 \%$.

ВИСНОВКИ

Обґрунтовано можливість використання парціального витратоміра із термочутливим термодавачем для визначення теплоти згорання природного газу шляхом використання коефіцієнта тепловіддачі як інформативного параметра при його функціонуванні.

Розроблена метрологічна модель визначення коефіцієнта тепловіддачі термочутливого давача при функціонуванні парціального витратоміра.

Обчислено сумарну невизначеність визначення цього коефіцієнта, що обґрунтовує можливість практичного застосування парціальних витратомірів для обліку енергетичної цінності природного газу, яка становить $23,927954 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Встановлені кореляційні залежності між коефіцієнтом тепловіддачі і теплотою згорання,

які можуть бути покладені в основу функціонування парціального витратоміра з корекцією по теплотворній здатності.

1. Крук І.С. Облік природних газів за їх енергетичною цінністю / І.С. Крук // "Приладобудування: стан і перспективи": XIII Міжнародна наук.-техн. конф., м. Київ, 23-24 квітня 2014 р. – С. 220-221. 2. Романів В.М. Дослідження експериментального зразка системи контролю енерговмісту природного газу / В.М. Романів, С.А. Чеховський // Метрологія та прилади. – 2014. – № 1. – С. 192-196. 3. Природний газ. Визначення енергії. ДСТУ ISO 15112:2009. – К.: Держспоживстандарт України, 2010. – 48 с. 4. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник / П.П. Кремлевский. – Л.: Машиностроение, 1989. – 701 с. 5. Расход жидкости и газа. Методика выполнения измерений по скорости в одной точке сечения трубы. ГОСТ 8.361-79. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1979. – 14 с. 6. Ващишак С.П. Сучасні підходи до створення інфрачервоних газоаналізаторів для аналізу природного газу / С.П. Ващишак, В.М. Романів, С.А. Чеховський // Нафтогазова енергетика. – 2007. – № 4(5). – С. 62-67. 7. Дарвай І.Я. Експериментальне дослідження нового методу визначення теплоти згорання природного газу / І.Я. Дарвай, О.М. Карпаш // Методи та прилади контролю якості. – 2010. – №24. – С. 90-94. 8. Пат. 99887 С2 Україна, МПК (2012.01) G 01 F 1/00. Парціальний витратомір / Середюк О.Є., Малісевич В.В. – №а 201114278; заявл. 02.12.11; опубл. 10.10.12, Бюл. № 19. 9. Алмазов В.В. Исследование метрологических характеристик термоанемометрических измерительных преобразователей массового расхода жидкости / В.В. Алмазов, Н.Н. Антонов // Измерительная техника. – 1980. – № 12. – С. 47-48. 10. Крейт Ф. Основы теплопередачи: Пер. с англ. / Ф. Крейт, У. Блек. – М.: Мир, 1983. – 512 с. 11. Рид Р. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд: Пер. с англ.: под ред. Б.И. Соколова. – Л.: Химия, 1982. – 592 с. 12. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки: ГОСТ 30319.1-96. – [Введен с

1997-07-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1997.–14 с. 13. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 720 с. 14. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов / В.С. Чиркин. – М.: Госуд. изд-во физико-матем. литературы, 1959. – 356 с. 15. Захаров И.П. Теория

неопределенности в измерениях / И.П. Захаров, В.Д. Кукуш. – Харьков: Консум, 2002. – 256 с.

Поступила в редакцію 21.05.2014р.

**Рекомендували до друку: докт. техн. наук
Кісіль І. С. та докт. техн. наук
Заміховський Л. М.**