

УДК 681.121.089

**ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПРИРОДНОГО ГАЗУ НА ТОЧНІСТЬ  
ВИМІРЮВАННЯ ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ ТУРБІННИМИ ЛІЧИЛЬНИКАМИ****Н.Б. Клочко, С.А. Чеховський***Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
вул. Карпатська, 15, м.Івано-Франківськ, 76019*

*Проведено дослідження турбінних лічильників з метою оцінювання впливу параметрів природного газу на точність вимірювання об'ємної витрати. Запропоновано новий підхід до оцінювання стабільності потоку вимірюваного середовища та на основі цього підходу здійснено оцінку стабільності потоку при метрологічних дослідженнях турбінних газових лічильників.*

*Ключові слова: природний газ, турбінні лічильники, параметри природного газу, точність.*

*Проведено исследование турбинных счетчиков с целью оценки влияния параметров природного газа на точность измерения объемного расхода. Предложен новый подход к оценке стабильности потока мерной среды и на основе этого подхода осуществлена оценка стабильности потока при метрологических исследованиях турбинных газовых счетчиков.*

*Ключевые слова: природный газ, турбинные счетчики, параметры природного газа, точность.*

*This paper deals with a study of turbine gas meters to assess the impact of natural gas parameters on the accuracy of the flow metering. A new approach of evaluating the gas flow stability is suggested and based on this approach the estimation of the gas flow stability during metrological studies of turbine gas meters is held.*

*Key words: natural gas, turbine flow meters, parameters of natural gas, accuracy.*

**Вступ.** На сьогодні у нафтогазовій промисловості залишається актуальним питання підвищення точності результатів вимірювання об'єму та об'ємної витрати природного газу турбінними лічильниками [1-5]. Актуальність цієї проблеми зумовлена труднощами, які виникають при виборі алгоритму для опрацювання результатів метрологічних досліджень турбінних лічильників газу, адже необхідним є врахування не лише параметрів вимірюваного процесу, а й закону розподілу результатів вимірювання.

У [1,5] запропоновано математичні моделі рівняння вимірювання об'ємної витрати турбінними лічильниками газу, зокрема у [9] автор враховує властивості вимірюваного потоку та вид закону розподілу результатів дослідження турбінних лічильників газу в лабораторних умовах, проте не досліджено вплив параметрів природного газу та пульсацій потоку на точність вимірювання.

**Формулювання мети статті.** На основі результатів метрологічних досліджень турбінних лічильників газу на реальному середовищі в умовах випробувальної лабораторії ПУЛГ-1, що діє у ПАТ «Івано-

Франківськгаз», виявлено вплив параметрів природного газу на точність вимірювання турбінними лічильниками, що зумовило необхідність оцінювання такого впливу на точність вимірювання об'ємної витрати турбінними лічильниками.

**Виклад основного матеріалу.** «Ідеальна» калібрована швидкість обертання турбіни визначається силами, які діють на турбину, проте в реальних умовах вимірювального експерименту на реальному (газовому) середовищі існують сили дії на турбину, які викликають відхилення кутової швидкості обертання від її ідеальної характеристики. Дане відхилення можна охарактеризувати функцією безрозмірного відношення сил інерції до сил в'язкості, тобто числом Рейнольдса. В основному, ці сили уповільнюють швидкість обертання турбіни, відповідно, збільшуючи похибку вимірювання витрати.

Турбінні газові лічильники призначені і відкалібровані в умовах рівномірного осьового потоку. А це означає, що, якщо у потоці газу виникають завихрення на вході турбіни, то залежно від напрямку цих завихрень, турбіна може збільшити або зменшити швидкість обертання, що призведе до завищених або

занижених показів лічильника, а. отже, споживач або постачальник можуть зазнати втрат. Окрім сил опору вимірювального середовища, що сповільнюють рух турбіни, додатково має місце тертя у підшипниках ротора та механічні навантаження на привід індикаторів потоку.

У [5] автором запропонована теоретична модель для визначення відношення кутової швидкості обертання турбіни  $\omega_i$  до об'ємної витрати  $q_v$ . При цьому дане відношення є наближеним виразом для коефіцієнта перетворення лічильника, який за умов проведення експерименту визначається як функція від критерію Рейнольдса  $K=f(Re)$ . Тому

відношення  $\frac{\omega_i}{q_v}$  будемо вважати теоретичним

значенням коефіцієнту перетворення лічильника (надалі це відношення позначатимемо як  $K$ ), який нормується заводськими параметрами. Для досліджуваного турбінного лічильника вітчизняного виробництва ЛГК-100-Ех одержано теоретичну модель визначення коефіцієнта перетворення лічильника із врахуванням конструктивних особливостей турбіни, параметрів природного газу та властивостей вимірного потоку:

$$K = \frac{\tan \beta}{rS} - \frac{0.036n(R+r)SA^{-2} \sin \beta}{r^2} \times \left( \frac{1.23\rho \cdot q_v (\rho_c^{0.5} + 2.08 - 1.5(x_{N_2} + x_{CO_2}))}{\pi D(T^{0.5} + 1.37 - 9.09\rho_c^{0.125}) \cdot 10^{-6}} \right)^{-0.2}, (1)$$

де  $\beta$  – кут нахилу лопатей турбіни відносно осі;  $r$  – ефективний радіус турбіни (середньоквадратичне значення внутрішнього та зовнішнього радіусу лопаті ( $R, r$ ));  $n$  – кількість лопатей турбіни;  $S$  – площа поперечного перерізу потоку,  $m^2$ ;  $T$  – температура природного газу,  $K$ ;  $x_{N_2}, x_{CO_2}$  – вміст азоту та двооксиду вуглецю, відповідно;  $\rho_c$  – густина природного газу за робочих умов,  $kg/m^3$ ;  $D$  – діаметр вимірювального трубопроводу,  $m$ ;  $q_v$  – об'ємна витрата газу,  $m^3/s$ .

У запропонованій моделі (1) параметри вимірного середовища характеризує динамічна в'язкість природного газу. Зі зміною в'язкості змінюватимуться інертні властивості потоку газу і, відповідно, сили тертя між шарами газу. Динамічна в'язкість при сталих температурі та тиску залежить від внутрішніх властивостей газу. У [7] ця залежність при тисках до 0,5

МПа подано як:

$$\mu = 3.24 \frac{T^{0.5} + 1.37 - 9.09\rho_c^{0.125}}{\rho_c^{0.5} + 2.08 - 1.5(x_{N_2} + x_{CO_2})}. (2)$$

Причому формула (2) застосовна в діапазоні температур 240-360  $K$ . Похибка визначення в'язкості в цьому діапазоні не перевищує 3% для природного газу, якщо похибки вимірюваних параметрів прийняті рівними нулю [7]. В'язкість природного газу збільшується при збільшенні температури, оскільки збільшення температури веде до збільшення швидкості теплового руху молекул, що робить газ більш в'язким.

У математичній моделі для визначення теоретичного значення коефіцієнта перетворення турбінного лічильника вплив параметрів природного газу визначається коефіцієнтом динамічної в'язкості. Коефіцієнт динамічної в'язкості впливає на точність вимірювання об'єму та витрати газу турбінними лічильниками через зміну числа  $Re$ . В'язкість природного газу збільшується при збільшенні температури, оскільки збільшення температури веде до збільшення швидкості теплового руху молекул, що робить газ більш в'язким. Необхідно дослідити, як впливає зміна кожного із параметрів природного газу на коефіцієнт перетворення турбінного лічильника.

При метрологічних дослідженнях турбінного лічильника газу на реальному середовищі значення параметрів густини газу, концентрації азоту та двооксиду вуглецю подавалися у паспорті газу. У табл.1 наведено їх значення. На основі проведених розрахунків побудовані графічні залежності (рис.1) зміни коефіцієнта перетворення турбінного лічильника газу, який пропонується визначати за (1), від кожного параметра природного газу.

З метою оцінки вагомості впливу кожного параметра для розрахунку коефіцієнта на його величину обчислювалися коефіцієнти вагомості за формулою:

$$\frac{\partial K}{\partial q_i} \cong \frac{K_{qi}^{\max} - K_{qi}^{\min}}{q_{\max} - q_{\min}}, (3)$$

де  $\frac{\partial K}{\partial q_i}$  – коефіцієнт вагомості впливу  $i$ -го параметра природного газу на обчислення коефіцієнта перетворення лічильника  $K$ ;  $q_{\max}, q_{\min}$  – максимальне та мінімальне значення параметра, відповідно;  $K_{qi}^{\max}, K_{qi}^{\min}$  – значення

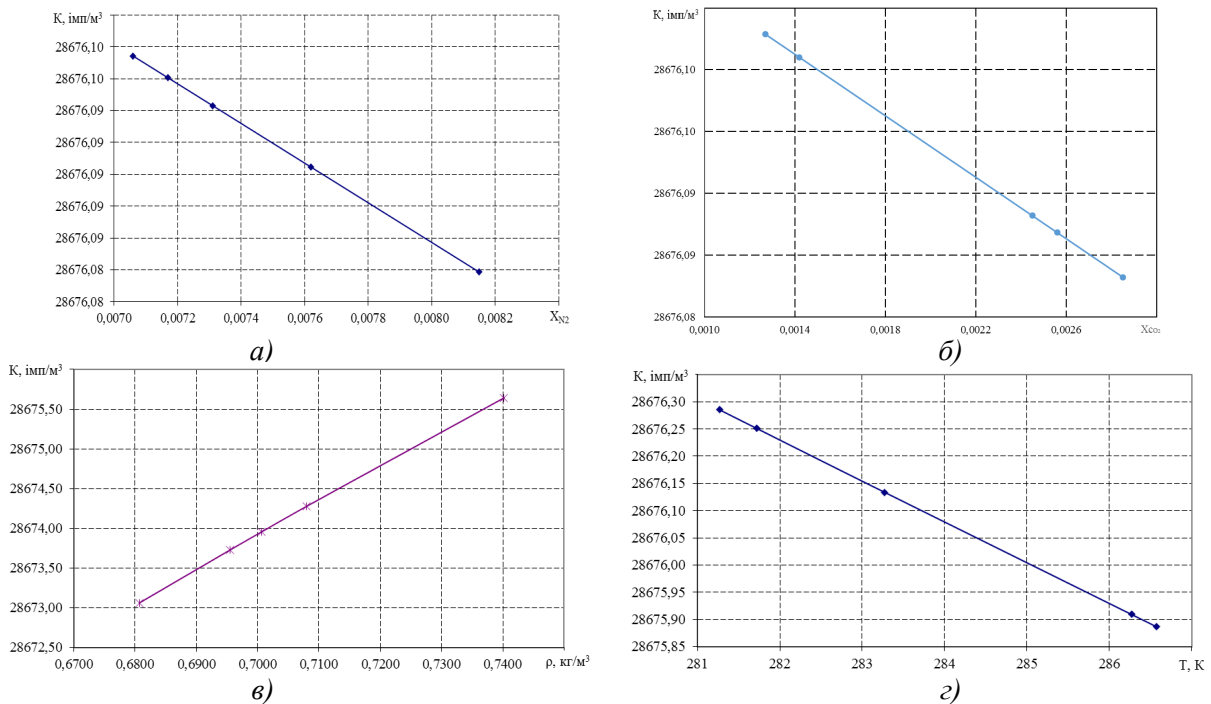
коефіцієнта перетворення лічильника при максимальному та мінімальному значенні параметра природного газу, відповідно.

**Таблиця 1 – Значення параметрів природного газу при метрологічних дослідженнях турбінних лічильників газу**

Густина, кг/м <sup>3</sup>	Молярна концентрація азоту, відн. од.	Молярна концентрація двоокису вуглецю, відн. од.	Абсолютна температура, Т, К
0,6807	0,005060	0,004580	281,2700
0,6955	0,005620	0,002850	281,7200
0,7006	0,007310	0,002560	283,2700
0,7080	0,009050	0,001420	286,2700
0,7402	0,007170	0,001270	289,5700

Результати обчислень подані в табл. 2. У [8] запропоновано використовувати безрозмірний коефіцієнт вагомості, що дає змогу оцінити ступінь впливу зміни кожного із впливових факторів за умови його зміни на 1%. Таким чином, формула (3) набуде вигляду:

$$\frac{\partial K'}{\partial q_i} \cong \left[ \frac{K_{q_i}^{\max} - K_{q_i}^{\min}}{(q_{\max} - q_{\min}) / q_i \cdot 100\%} \right], \quad (4)$$



*a* – при зміні молярної концентрації азоту; *б* - при зміні молярної концентрації двоокису вуглецю; *в* – при зміні густини; *г* – при зміні абсолютної температури

**Рисунок 1 – Зміна коефіцієнта перетворення лічильника від параметрів природного газу**

де  $\frac{\partial K'}{\partial q_i}$  – безрозмірний коефіцієнт вагомості впливу  $i$ -го параметра природного газу на обчислення коефіцієнта перетворення лічильника;  $\bar{q}_i$  – середнє значення  $i$ -того вхідного параметра газу.

Отримані результати дослідження впливу параметрів природного газу на коефіцієнт перетворення турбінного лічильника (рис. 1 та табл. 2) доводять, що найбільшими факторами впливу на коефіцієнт перетворення турбінного лічильника  $K$  є абсолютна температура та густина природного газу. На це вказують значення обчисленого ступеню впливу зміни кожного із впливових факторів за умови його зміни на 1%. Вплив концентрації азоту і диоксиду вуглецю є меншим. Звідси випливає, що при обчисленні коефіцієнта перетворення турбінного лічильника газу разом із геометричними параметрами турбіни ключовими є параметри природного газу, причому зміна густини та абсолютної температури на 10% призводять до зміни коефіцієнта перетворення лічильника на 0,01% та 0,007%.

**Таблиця 2 – Значення коефіцієнтів вагомості вхідних параметрів розрахунку коефіцієнта перетворення турбінного лічильника газу**

Вхідний параметр	$\frac{\partial K}{\partial q_i}, \frac{mn}{m^3} / 1\%$	$\frac{\partial K'}{\partial q_i}$
Молярна концентрація азоту, відн. од.	-0,0009	$-3,23 \times 10^{-6}$
Молярна концентрація двоокису вуглецю, відн. од.	-0,0003	$-9,15 \times 10^{-7}$
Густина $\rho_c$ , кг/м <sup>3</sup>	-0,2133	$-0,7 \times 10^{-3}$
Абсолютна температура T, К	0,3058	$1 \times 10^{-3}$

Варто зауважити, що при метрологічних дослідженнях лічильників газу, зокрема турбінних, витрата робочого середовища повинна бути постійною або повільно змінною в часі.

Відповідно до [9] допускаються пульсації потоку, якщо виконується умова не перевищення середнього квадратичного відхилення миттєвих значень перепаду тиску:

$$S_{q_v} = \frac{\left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta p_i - \overline{\Delta p})^2 \right)^{1/2}}{\overline{\Delta p}} \leq 0,1, \quad (5)$$

де  $n$  – число вимірювань перепаду тиску за інтервал часу, прийнятий для оцінки пульсацій потоку;  $i$  – номер вимірювання;  $\Delta p_i$  – значення перепаду тиску при  $i$ -му вимірюванні;  $\overline{\Delta p}$  – середнє значення перепаду тиску.

Оскільки під час вимірювання об'єму температура коливається в межах 8°C (як видно з результатів), то при дослідженні пульсацій потоку пропонується враховувати не лише коливання тиску, а й температури.

За такої умови формула (5) набуде вигляду:

$$S_{q_v} = \frac{\left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{p_i}{T_i} - \overline{\frac{p}{T}} \right)^2 \right)^{1/2}}{\overline{\frac{p}{T}}} \leq 0,1 \quad (6)$$

Під час опрацювання результатів дослідження турбінних газових лічильників розрахунок відношення  $\frac{p_i}{T_i}$  проводився як в межах однієї вибірки (тобто для результатів вимірювання миттєвих значень об'ємної витрати), так і для кількох вибірок з

результатами досліджень у одній і тій же контрольній точці (тобто для усереднених значень об'ємної витрати). Нижче подані результати дослідження стабільності потоку для усереднених значень об'ємної витрати в контрольній точці  $q_v=100$  м<sup>3</sup>/год на середньому тиску.

Оцінювання пульсацій потоку проводилось з метою перевірки на коректність експериментальних досліджень, при яких відтворена витрата на еталонній установці приймалася стабільною. Як видно з результатів, наведених в табл. 3, 4 показник стабільності вимірного середовища при дослідженні турбінних лічильників на порядок менший максимально допустимої норми, регламентованої нормативним документом [9]. Тому можна зробити висновок, що пульсації вимірного середовища не впливають на точність вимірювання об'ємної витрати турбінними лічильниками газу в умовах випробувальної установки ПАТ «Івано-Франківськгаз».

**Таблиця 3 – Результати досліджень стабільності потоку вимірного середовища для усереднених значень об'ємної витрати в контрольній точці  $q_v=100$  м<sup>3</sup>/год**

$p_i$ , кПа	$T_i$ , К	$p_i/T_i$ , кПа/К	$S_{q_v}$
331,21	286,34	1,1567	0,010452
331,21	286,33	1,1567	
331,23	286,30	1,1569	
331,21	286,28	1,1570	
331,19	286,25	1,1570	

**Таблиця 4 – Результати досліджень стабільності потоку вимірного середовища для миттєвих значень об'ємної витрати в контрольній точці  $q_v=100$  м<sup>3</sup>/год**

$p_i$ , кПа	$T_i$ , К	$p_i/T_i$ , кПа/К	$S_{q_v}$
331,01	286,45	1,15556	0,0050617
330,97	286,46	1,15539	
331,00	286,45	1,15553	
330,98	286,45	1,15546	
330,98	286,44	1,15549	
330,97	286,45	1,15543	
330,98	286,44	1,15548	
330,97	286,43	1,15550	
330,96	286,43	1,15546	
330,97	286,43	1,15551	
330,96	286,42	1,15552	
330,97	286,41	1,15560	
330,96	286,4	1,15560	

## ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень впливу параметрів природного газу на точність вимірювання об'ємної витрати турбінними лічильниками отримано графічні залежності зміни коефіцієнта перетворення лічильника від параметрів природного газу. Встановлено, що найбільш суттєвими є вплив густини та абсолютної температури, зміна яких на 10% призводять до зміни коефіцієнта перетворення лічильника на 0,01% та 0,007%, відповідно.

Запропоновано новий критерій для визначення впливу пульсації потоку на точність вимірювання об'ємної витрати турбінними лічильниками газу. Встановлено, що зміна тиску без врахування непостійності температури не приводить до пульсацій, які би перевищували 0,1%, чим обґрунтовано відсутність впливу пульсацій вимірного середовища на імовірнісні характеристики результату вимірювання об'єму турбінними лічильниками.

1. Воциньський В. В. Математична модель швидкостей потоку в кільцевому січєнні турбінного лічильника газу. / Воциньський В. В. // Методи та прилади контролю якості - №6. - 2000- С.61-63. 2. Долішня Н. Б. Підвищення точності опосередкованого вимірювання витрати газу з урахуванням властивостей потоку та фізичних основ роботи турбінних лічильників /Н. Б. Долішня, Л. А. Витвицька, Н. М. Піндус// Електротехнічні та комп'ютерні системи № 06(82), 2012. - С.198-204. 3. Wadlow D. Chapter 28.4 Turbine and vane flowmeters / Wadlow D., Webster J.G. // The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook. – Boca Raton, FL: CRC Press. – Dec. 1998. 4. Кремлевский П. П. Расходомеры и счётчики

количества:-Л. Машиностроение. Ленинградское отделение, 1989. - 701 с. 5. Долішня Н. Б. Вдосконалення алгоритму опрацювання результатів вимірювання витрати природного газу турбінним лічильником газу / Н. Б. Долішня // Нафтогазова енергетика № 2(18), 2012. - С.127-131. 6. Rubin, M., Miller, R.W., and Fox, W.G. Driving Torques in a Theoretical Model of a Turbine Meter, Transactions of the ASME. Journal of Basic Engineering, Paper Number 64 - WA/FM-2, 1965. 7. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки: ГОСТ 30319.1-96. – [Введен с 2000-01-01]. – К.: Госстандарт Украины, 1999. – 16 с. – (Межгосударственный стандарт). 8. Винничук А. Г. Вдосконалення методу вимірювання витрати газу з використанням торцевих звужувальних пристроїв [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук:05.11.01 / Винничук Анна Григорівна; Нац. ун-т "Львів. політехніка".-Л.,2012.-20 с. 9. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 1. Принцип методу вимірювання та загальні вимоги: ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009. – [Чинний від 2010-04-01]. – К.: Держстандарт України, 2009. – 100 с. – (Державний стандарт України).

**Поступила в редакцію 08.12.2015р.**

**Рекомендували до друку: докт. техн. наук, проф. Середюк О.Є., докт. техн. наук, проф. Пістун Є. П.**