

**М. П. Андрійшин**, канд. техн. наук, доц.  
Національний авіаційний університет  
orcid.org/0000-0002-4439-3526  
e-mail: andriishinmp@gmail.com;

**К. І. Капітанчук**, канд. техн. наук, доц.  
Національний авіаційний університет  
orcid.org/0000-0003-3605-0977  
e-mail: k.kapitanchuk@ukr.net;

**О. М. Чернишенко**, заступник начальника відділу  
Національна комісія регулювання енергетики та комунальних послуг  
orcid.org/0000-0001-5539-0358  
e-mail: ench\_st@1/ua;

**О. В. Афанасьєв**, головний фахівець  
Центр метрології та газорозподільних систем НАК «Нафтогаз України»  
orcid.org/0000-0002-0914-1534  
e-mail: afanasyevo@naftogaz.com

## ВПЛИВ ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИРОДНОГО ГАЗУ НА ДИНАМІКУ ПРОЦЕСІВ В КІЛЬЦЕВІЙ РЕШІТЦІ ТУРБІННОГО ЛІЧИЛЬНИКА

### Вступ

Функціонування ринку природного газу в Україні закладає необхідні умови забезпечення високого рівня захисту прав та інтересів споживачів, у тому числі — забезпечення першочергової зацікавленості в стабільності та безпеці постачання природного газу при додержанні встановлених технічних норм та стандартів безпеки [1].

У цих умовах актуальним є питання метрологічного забезпечення засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати природного газу, особливо тих, що застосовуються для комерційного обліку. Точність обліку природного газу при цьому залежить від типу лічильника, його конструкції та зміни перепаду тиску. Отже, необхідно володіти достатніми знаннями, на яких базуються відповідні закономірності, що дозволяють співставляти фізичні процеси та кількісні показники плинного середовища в проточній частині робочого елемента лічильника.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Процеси, які відбуваються в проточній частині робочого елемента турбінного лічильника описані в працях [2; 3; 4] та ін.

Однак ці дослідження та їх результати базуються, в основному, на дослідженні газодинамічних процесів у циліндричній частині до входу газу в кільцеву решітку турбіни.

У праці [5] доведено, що метрологічні характеристики лічильника, який калібрований на плинному середовищі, відрізняються від паспортних при зміні середовища, у якому він експлуатується.

При змінненні тиску, температури та інших фізичних параметрів потоку показники лічильника знаходяться у межах визначеної похибки за умови рівності чисел Рейнольдса для потоку плинного середовища, що перетікає через кільцеву решітку турбіни.

У працях [5; 6] показано, що у випадку рівності чисел Рейнольдса, відносна похибка лічильника залишається сталою, незалежно від виду середовища.

### Мета статті (постановка завдання)

Визначити вплив параметрів природного газу на динаміку фізичних процесів, що відбуваються в кільцевій решітці турбінного лічильника та критерії для можливості калібрування турбінного лічильника при зміні параметрів природного газу в процесі експлуатації.

### Постановка завдання на дослідження

Робочим органом турбінного лічильника є активна турбіна, степінь реактивності якої дорівнює нулю. Величина відносної швидкості потоку на вході  $W_1$  та на виході з решітки робочого елементу  $W_2$  такої турбіни є сталою величиною, а зусилля на робочі лопатки здійснюються за рахунок зміни напрямку швидкості потоку.

Тобто відносна швидкість  $W$  у проточній частині робочого елементу розкладається на дві складові: обертову  $W_n$ , яка спричинює обертовий рух турбіни, та осьову  $W_i$ , що забезпечує переміщення відповідної кількості плинного середовища через кільцеву решітку робочого елементу лічильника.

Відношення обертової швидкості до осьової для кільцевої турбінної решітки є сталою величиною і одним з основних критеріїв подібності

$$W_n/W_i = k. \quad (1)$$

Критерій подібності (1) не залежить від фізичних параметрів плинного середовища, а залежить від конструкції кільцевої решітки турбіни (рис. 1) та технічного стану лічильника (коефіцієнту тертя в підшипниках, чистоти вхідного фільтра та проточної частини).

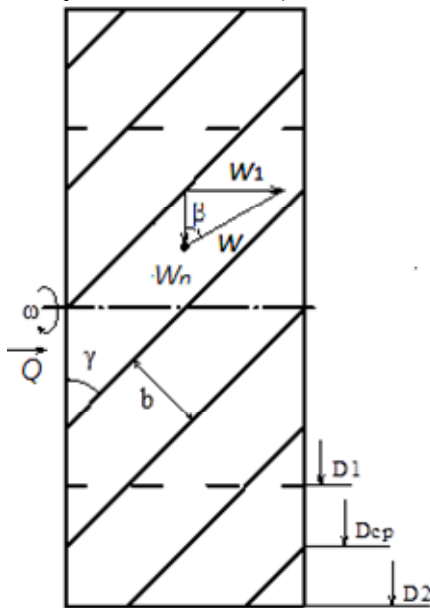


Рис. 1. Конструктивні параметри турбінного лічильника SM-RI-X-KG1000, DN200

До конструктивних параметрів решітки відносять [7]: висоту лопаток —  $l$ ; кількість лопаток —  $t$ ; середній діаметр кільцевої решітки турбіни —  $D_{cp} = (D_1 + D_2)/2$ , відносну висоту лопаток —  $l/D_{cp}$ ; міжлопаткову відстань —  $b$ ; відносний крок лопаток на середньому радіусі —  $t/b$ ; фор-

му лопаток; кут встановлення лопаток —  $\gamma$  в решітці на різних радіусах.

Очевидно, що кут входу (виходу) плинного середовища в осьову решітку турбіни  $\beta$  не співпадає з кутом встановлення лопатки  $\gamma$ . Різниця кута на вході називають кутом набігання, а на виході із решітки кутом відставання.

На рис.1 схематично представлені конструктивні параметри кільцевої решітки турбіни лічильника SM-RI-X-KG1000, DN200.

Кільцева решітка турбіни лічильника має такі геометричні параметри:  $D_1 = 205$  мм,  $D_2 = 154$  мм,  $D_{cp} = 179,5$  мм,  $b = 5$  мм,  $\gamma = 45^\circ$ ,  $\beta = 61^\circ$ ,  $h = 25,5$  мм.

З метою встановлення реальних значень обертової  $W_n$ , осьової  $W_i$  та відносної швидкостей  $W$ , критерія подібності  $k$  та кута входу потоку газу в кільцеву турбінну решітку  $\beta$  для даного лічильника на калібрувальному стенді було проведено ряд експериментальних досліджень з використанням як робоче середовище—повітря.

Об'ємна витрата лічильника змінювалась від  $Q_{min} = 80$  м<sup>3</sup>/год до  $Q_{max} = 1600$  м<sup>3</sup>/год при зміні величини тиску від  $p_{min} = 100$  кПа до  $p_{max} = 700$  кПа. [6].

### Результати досліджень

Результати експериментальних досліджень на стенді подано в табл. 1.

Дослідження довели, що при зміні обертової швидкості  $W_n$  від 0,98 м/с до 19,4 м/с, осьової швидкості  $W_i$  від 1,7 м/с до 35,1 м/с та відносної швидкості  $W$  від 2,3 м/с до 46 м/с залежно від абсолютного тиску газового середовища та його витрати критерій подібності залишався незмінним і дорівнював  $k = 0,553$ .

Розглянуто залежність кутової швидкості турбіни лічильника  $\omega$  від числа Рейнольдса  $Re$  потоку плинного середовища, що перетікає через кільцеву решітку.

Рівність (1) представлено у вигляді

$$k = \omega D_{cp} / 2W_i, \quad (2)$$

а число Рейнольдса у вигляді

$$Re = \frac{4R_g}{\mu} \rho W_i = \frac{4R_g}{\mu} \frac{p}{zRT} W_i, \quad (3)$$

де  $R_g$  — гідралічний радіус кільцевої решітки турбіни;  $\rho$  — густина;  $\mu$  — динамічна в'язкість потоку плинного середовища;  $p$  — тиск,  $R$  — газова стала;  $z$  — коефіцієнт стиснення;  $T$  — температура, відповідно.

## Результати експериментальних досліджень

	$Q$ , м <sup>3</sup> /год	$p$ , бар	$T$ , °C	$\delta$ , %	$\beta$ , град	$W_i$ , м/с	$W_n$ , м/с	$W$ , м/с	$W_n/W_i$
1 бар	77,26436	1,029031	14,60656	-1,93537	61,05316	1,788527	0,989229	2,345559	0,553097
	1515,63	1,02137	14,63613	-0,34094	61,05316	35,08402	19,40486	46,01085	0,553097
1,5 бара	83,24398	1,565633	14,71132	-0,51889	61,05316	1,926944	1,065787	2,527086	0,553097
	1143,814	1,536033	14,98275	-0,08638	61,05316	26,47719	14,64445	34,72344	0,553097
1,7 бара	79,36739	1,706152	14,37008	-1,50816	61,05316	1,837208	1,016154	2,409402	0,553097
	1292,979	1,675377	14,47381	-0,22703	61,05316	29,93006	16,55422	39,2517	0,553097
2 бари	85,3376	2,083882	20,62826	-0,50564	61,05316	1,895823	1,048574	2,590643	0,553097
	1266,985	2,04508	20,9764	-0,22182	61,05316	28,0782	15,52997	38,46259	0,553097
2,5 бара	131,5926	2,544862	29,6673	-0,21673	61,05316	3,046125	1,684802	3,994833	0,553097
	1192,768	2,45112	29,92996	-0,27662	61,05316	27,61036	15,27121	36,20954	0,553097
3 бари	82,22063	3,02918	15,28748	-0,93252	61,05316	1,903255	1,052685	2,496019	0,553097
	1094,522	3,079774	15,10496	-0,10889	61,05316	25,33616	14,01335	33,22705	0,553097
4 бари	80,22753	4,125961	21,19302	-0,09281	61,05316	1,857119	1,027167	2,435513	0,553097
	1033,377	4,056986	21,63516	-0,10322	61,05316	23,92076	13,2305	31,37081	0,553097
5 бар	83,0656	5,111237	20,61264	-0,25276	61,05316	1,922815	1,063503	2,52167	0,553097
	948,0284	4,97733	21,03734	-0,07187	61,05316	21,9451	12,13777	28,77985	0,553097
6 бар	85,89529	6,142233	20,46773	-0,29916	61,05316	1,988317	1,099732	2,607573	0,553097
	909,4109	6,027679	20,92208	-0,064	61,05316	21,05118	11,64334	27,60751	0,553097
7 бар	82,385	6,794484	20,11842	-0,11862	61,05316	1,90706	1,054789	2,501009	0,553097
	837,6646	6,626538	20,60357	-0,08935	61,05316	19,39039	10,72476	25,42947	0,553097

Виразивши рівність (2) через осьову швидкість  $W_i$  та підставивши в (3) отримано вираз, що описує залежність кутової швидкості (кількості обертів) кільцевої решітки турбіни від фізичних параметрів газового середовища та числа Рейнольдса потоку плинного середовища, а саме:

$$\omega = \frac{k}{4\pi R_g D_{cp}} \frac{Re Rz T \mu}{p} = A \frac{Re Rz T \mu}{p}, \quad (4)$$

де  $A = \frac{k}{4\pi R_g D_{cp}}$  — стала величина.

З рівності (4) видно, що кутова швидкість прямопропорційна динамічній в'язкості і числу Рейнольдса та обернено пропорційна величині тиску потоку плинного середовища.

Проведена оцінка можливості перенесення результатів дослідження при роботі лічильника в середовищі — природний газ. Результати такої оцінки представлено в праці [5].

Дані результатів теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень при сталих значеннях числа Рейнольдса представлено на рис. 2 у вигляді залежності  $\omega = f(p)$  частоти обертання турбінного лічильника від тиску.

Залежність представляє собою сімейство гіперболічних кривих типу  $y = a/x$  для різних значень числа Рейнольдса. Констатуємо, що значний вплив величини тиску на частоту обертання лічильника прослідковується до 5 бар.

При тиску більшому за 5 бар вплив його величини на частоту обертання лічильника стає незначним. Робота турбінного лічильника газу, при абсолютному тиску до 5 бар, досить чутлива до зміни робочого тиску середовища, особливо при великих числах Рейнольдса. При числах Рейнольдса більше 40 тис., відносна похибка турбінного лічильника наближується до мінімальної [6].

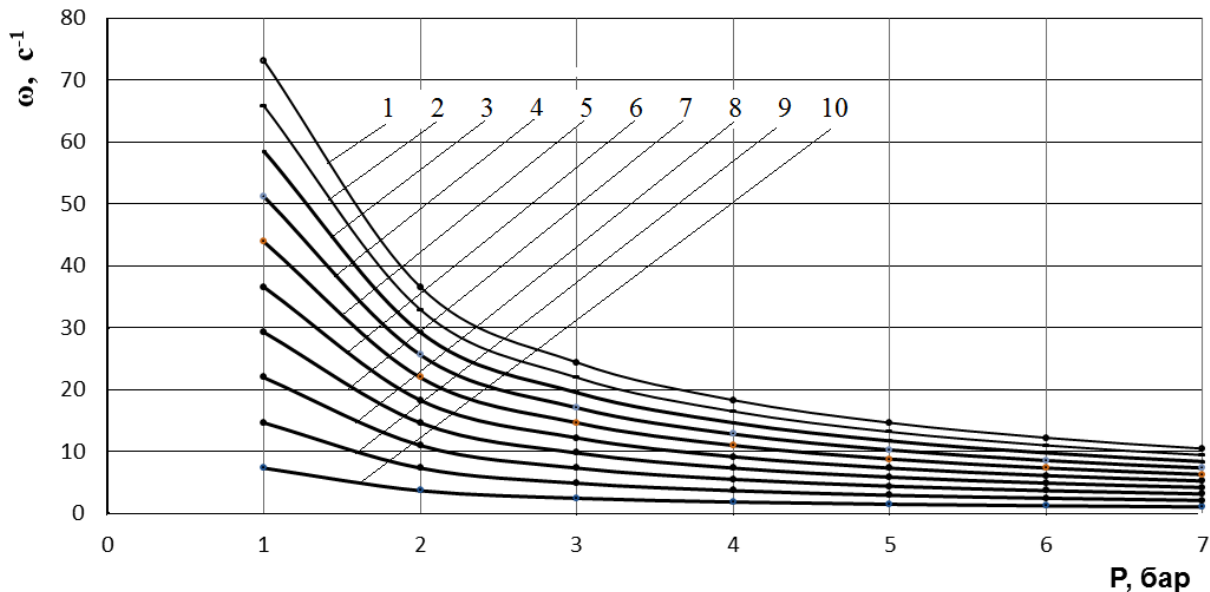


Рис. 2. Залежність частоти обертання турбінного лічильника від тиску при різних числах Рейнольдса:  
 1 —  $Re = 10^5$ ; 2 —  $Re = 9 \cdot 10^4$ ; 3 —  $Re = 8 \cdot 10^4$ ; 4 —  $Re = 7 \cdot 10^4$ ; 5 —  $Re = 6 \cdot 10^4$ ; 6 —  $Re = 5 \cdot 10^4$ ;  
 7 —  $Re = 4 \cdot 10^4$ ; 8 —  $Re = 3 \cdot 10^4$ ; 9 —  $Re = 2 \cdot 10^4$ ; 10 —  $Re = 10^4$

Тому вибір типу лічильника, який передбачено для роботи в межах значень з мінімальною похибкою у всьому діапазоні його роботи, при абсолютному тиску до 5 бар є досить актуальною процедурою. З іншого боку, лічильник, який передбачено для роботи в зоні низьких тисків, бажано калібрувати на середовищі його експлуатації за реальних перепадах тиску та температури.

Отже, регламентоване у праці [8] положення, яке дозволяє проводити калібрування лічильника на повітрі (газі) до величини абсолютного тиску в 4 бари за атмосферного тиску ( $\pm 100$  мбар) підлягає коригуванню.

#### Висновки

З метою підвищення якості та достовірності обліку природного газу, калібрування лічильників, що експлуатуються при абсолютному тиску до 5 бар, необхідно проводити на реальному газовому середовищі з урахуванням діапазону зміни тиску та температури робочого середовища. Калібрування лічильників природного газу, що передбачено для роботи в газовому середовищі з тиском, що перевищує 5 бар можливо на іншому плинному середовищі за умови дотримання відповідного числа Рейнольдса [6].

#### Перспективи подальших досліджень

З метою створення оптимальних умов експлуатації турбінного лічильника природного газу в частині метрологічних та динамічних характеристик, який експлуатується при робочому середовищі до 5 бар абсолютного тиску, необхідно розробити додаткові критерії його вибору. Критерії повинні мінімізувати вплив зміни тиску на чут-

ливий елемент лічильника (турбіну) та зменшити похибки лічильника у всьому діапазоні вимірювань.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Закон України «Про ринок природного газу» від 09.04.2015. № 329-VIII.
2. Расходомеры и счетчики количества веществ: справочник / сост. П. П. Кремлевский. Кн. 1. 5-е изд. — Санкт-Петербург: Политехника, 2002. — 409 с.
3. Рак А. М., Коробко І. В., Кротевич В. В., Щупак І. В. Урахування характеристик робочого середовища при застосуванні турбінних лічильників природного газу // Метрологія та прилади, №3, 2016.
4. Долішня Н. Б. Підвищення точності вимірювання витрати газу турбінними лічильниками з врахуванням характеристик потоку та конструктивних особливостей турбіни. // Електротехнічні та комп'ютерні системи, № 06(82), 2012. — С. 198–204.
5. Андришин М. П., Чеховский С. А., Чернышенко Е. Н., Афанасьев А. П. Применение элементов теории неопределенности для оценки влияния физических параметров текущей среды на работу счетчика газа во время его калибровки и эксплуатации // XIII Междунар. научно-технический семинар «Неопределенность измерений: научные, законодательные, методические и прикладные аспекты» (UM-2016). — Минск: БелГИМ, 2016. — 186 с.
6. Андришин М. П., Чернышенко О. М., Едель А. В. Особливості застосування газодинамічної теорії подібності в процесі калібрування та повірки лічильників природного газу. Нафтогазова галузь України. № 6, 2015. — С. 33–37.

7. Bogdanov M., Grekov P., Kapitanchuk K., Lastivka I. Construction of a compressor stage blade row according to the gas-dynamic calculation / journal Article published 24 Nov 2012 in Science-based

technologies volume 13 issue 1. doi.org/10.18372/2310-5461.13.5009.

8. ДСТУ EN 12261:2006. Лічильники газу турбінні. Загальні технічні умови. – К. Держспоживстандарт України. 2007. – 32 с.

**Андрішин М. П., Капітанчук К. І., Чернишенко О. М., Афанасьєв О. В.**

## **ВПЛИВ ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИРОДНОГО ГАЗУ НА ДИНАМІКУ ПРОЦЕСІВ В КІЛЬЦЕВІЙ РЕШІТЦІ ТУРБІННОГО ЛІЧИЛЬНИКА**

*У статті вперше визначено критерії для можливості калібрування турбінного лічильника при зміні параметрів природного газу в процесі експлуатації.*

*Доведено, що метрологічні характеристики лічильника, який калібровано на плинному середовищі, відрізняються від паспортних при зміні середовища, в якому він експлуатується. При змінній тиску, температури та інших фізичних параметрів потоку показники лічильника знаходяться в межах визначеної похибки, за умови рівності чисел Рейнольдса для потоку плинного середовища, що перетікає через кільцеву решітку турбіни. Показано, що у випадку рівності чисел Рейнольдса, відносна похибка лічильника залишається сталою незалежно від виду середовища.*

*Пропонується відношення обертової швидкості потоку до осевої складової швидкості для кільцевої турбінної решітки використати як основний критерій подібності, який не залежить від термодинамічних параметрів та фізичних властивостей плинного середовища, а залежить від конструкції кільцевої решітки турбіни та технічного стану лічильника (коефіцієнту тертя в підшипниках, чистоти вхідного фільтра та проточної частини).*

*На експериментальному стенді проведено серію досліджень на базі турбінного лічильника SM-RI-X-KG1000, DN200. При цьому об'ємна витрата лічильника змінювалась від 80 м<sup>3</sup>/год до 1600 м<sup>3</sup>/год при змінній величині тиску на вході від 100 кПа до 700 кПа. Результати теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень при сталих значеннях числа Рейнольдса представлено у вигляді залежності частоти обертання турбінного лічильника від тиску.*

*Виявлено, що лічильник, який передбачено для роботи в зоні низьких тисків, бажано калібрувати на середовищі його експлуатації при реальних перепадах тиску та температури. Доведено, що регламентоване ДСТУ EN 12261:2006. «Лічильники газу турбінні. Загальні технічні умови», положення, яке дозволяє проводити калібрування лічильника на повітрі (газі) до величини абсолютного тиску в 4 бари при атмосферному тиску ( $\pm 100$  мбар) підлягає корегуванню.*

*З метою підвищення якості та достовірності обліку природного газу, калібрування лічильників, що експлуатуються при абсолютному тиску до 5 бар, необхідно проводити на реальному газовому середовищі з врахуванням діапазону зміни тиску та температури робочого середовища. Калібрування лічильників природного газу, що передбачено для роботи в газовому середовищі з тиском, що перевищує 5 бар можливо на іншому плинному середовищі за умови дотримання відповідного числа Рейнольдса.*

**Ключові слова:** облік природного газу, турбінний лічильник, метрологічні характеристики, калібрування.

**Андрішин М. П., Капітанчук К. І., Чернышенко О. М., Афанасьев А. В.**

## **ВЛИЯНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ДИНАМИКУ ПРОЦЕССОВ В КОЛЬЦЕВОЙ РЕШЕТКЕ ТУРБИННОГО СЧЕТЧИКА**

*В статье впервые определены критерии для возможности калибрования турбинного счетчика при изменении параметров природного газа в процессе эксплуатации.*

*Доказано, что метрологические характеристики счетчика, который калиброван на текущей среде, отличаются от паспортных при изменении среды, в которой он эксплуатируется. При изменении давления, температуры или других физических параметров потока показатели счетчика находятся в диапазоне назначенной ошибки при условии равенства чисел Рейнольдса для потока текущей среды, проходящей через кольцевую решетку турбины. Показано, что при равенстве чисел Рейнольдса, относительная ошибка счетчика остается постоянной независимо от вида среды.*

*Предлагается отношение окружной скорости потока к осевой составляющей скорости для кольцевой турбинной решетки использовать как основной критерий подобия, который не зависит от термодинамических параметров и физических свойств текущей среды, а зависит от конструкции кольцевой решетки турбины и технического состояния счетчика (коэффициента трения в подшипниках, чистоты входного фильтра и проточной части).*

*На экспериментальном стенде проведено серию исследований на базе турбинного счетчика SM-RI-X-KG1000, DN200. При этом объемный расход счетчика изменялся от 80 м<sup>3</sup>/час до 1600 м<sup>3</sup>/час при изменении*

величины давления на входе от 100 кПа до 700 кПа. Результаты теоретических расчетов и экспериментальных исследований при постоянных величинах числа Рейнольдса представлено в виде зависимости частоты вращения турбинного счетчика от давления.

Выявлено, что счетчик, который предназначен для работы в зоне низких давлений, желательно калибровать на среде его эксплуатации при реальных перепадах давления и температуры. Доказано, что положение, определенное ДСТУ EN 12261:2006. «Лічильники газу турбінні. Загальні технічні умови», разрешающее тарироваться счетчик на воздухе (газе) при атмосферном давлении ( $\pm 100$  мбар) при его работе на природном газе до величины абсолютного давления в 4 бара, подлежит коррекции.

С целью повышения качества и достоверности учета природного газа, калибровка счетчиков, которые эксплуатируются при абсолютном давлении до 5 бар, необходимо проводить в реальной газовой среде с учетом диапазона изменения давления и температуры рабочей среды. Калибровка счетчиков природного газа, которые предназначены для работы в газовой среде с давлением, которое превышает 5 бар, возможна на другой текущей среде при условии поддержания назначенного числа Рейнольдса.

**Ключевые слова:** учет природного газа, турбинный счетчик, метрологические характеристики, калибрования.

**Andriyishyn M. P., Kapitanchuk K. I., Chernyshenko O. M., Afanasyev O. V.**

## **RESULTS OF NATURAL GAS PARAMETERS INFLUENCE ON PROCESSES THAT OCCUR IN TURBINE FLOW METERS**

*In the article criteria of possible turbine flow meters calibrations with natural gas parameters fluctuations are determined Article presents experimentation results of natural gas parameters influence on processes that occur in turbine flow meters.*

*In the article criteria of possible turbine flow meters calibrations with natural gas parameters fluctuations are determined. It is known that metrological parameters of the turbine flow meter in operating systems will deter from certified values. With pressure, temperature or other fluctuations of a flow physical parameters the flow meter's results will occur within of a error space determined by Reynolds number equation for current flow passing through turbine grille. With Reynolds numbers constant aspect ratio the relative error of a flow meter will stay irrelevant of type of the environment. It is suggested to use value as a criterion that is not affected by thermodynamic parameters and physical characteristics of a environment but of turbine grille model and mechanical state of a flow meter.*

*Turbine flow meter SM-RI-X-KG1000, DN200 was used for experiment with flow volume varies of 80 m<sup>3</sup>/h to 1600 m<sup>3</sup>/h and pressure varies of 100 kPa to 700 kPa. Results of theoretical calculations and experimental research data for Reynolds number ratio is shown on a graph of a turbine flow meter speed on pressure dependency.*

*It is determined that flow meter designed for low-pressure environment should be calibrated for actual range of operating environment pressure and temperature values. ДСТУ EN 12261:2006. «Лічильники газу турбінні. Загальні технічні умови», that allows usage of gas flow meter designed for 100mbar environment in set up with 4bar of absolute gas pressure should be corrected.*

*For improving of quality and precision of gas flow measurement, calibration of gas flow meters, designed for 5bar of absolute gas pressure, should be performed in an actual working environment keeping in mind range of realistic pressure and temperature fluctuations. Calibrations of gas flow meters that designed for gas pressure environment exceeding 5bar could be performed with environment that keeps defined Reynolds numbers ratio constant.*

**Keywords:** natural gas registration, turbine flow meters, metrological parameters, calibration.

Стаття надійшла до редакції 29.08.2017 р.

Прийнято до друку 01.09.2017 р.

Рецензент – д-р техн наук, проф. Терещенко Ю. М.