

# Особливості застосування газодинамічної теорії подібності в процесі калібрування та повірки лічильників природного газу

© **М.П. Андрішкін**  
канд. техн. наук  
**О.М. Чернишенко**  
**А.В. Едель**  
Метрологічний  
центр,  
Національна  
акціонерна компанія  
«Нафтогаз України»

УДК 006.91:681.121.089

*Розглянуто проблеми підвищення точності калібрування та повірки лічильників природного газу, проаналізовано міжнародний досвід та документальну базу. Запропоновано критерії оцінки коректності процедури калібрування лічильників великого діаметра групою еталонних лічильників меншого діаметра на основі теорії газодинамічної подібності. Також представлено результати розрахунків числа Рейнольдса для різних робочих середовищ, що підкреслюють важливість застосування критеріїв подібності під час калібрування та повірки лічильників природного газу.*

**Ключові слова:** газодинамічна теорія подібності, число Рейнольдса, лічильник природного газу, повірка, калібрування.

*Rассмотрены проблемы повышения точности калибровки и поверки счетчиков природного газа, проанализированы международный опыт и документальная база. Предложены критерии оценки корректности процедуры калибровки счетчиков большего диаметра группой эталонных счетчиков меньшего диаметра на основе теории газодинамического подобия. Также представлены результаты расчетов числа Рейнольдса для различных рабочих сред, которые подчеркивают важность применения критериев подобия при калибровке и поверке счетчиков природного газа.*

**Ключевые слова:** газодинамическая теория подобия, число Рейнольдса, счетчик природного газа, поверка, калибровка.

*The problem of increasing the calibration accuracy of natural gas flow meters was considered as well as the analysis of international experience and documentary base was done. A correctness evaluation criterion was proposed for calibration procedure of large diameter meters by group of standard meters with smaller diameters based on the theory of gas-dynamic similarity. Presented results of Reynolds number calculation for different working environment emphasize the importance of use of similarity criteria for natural gas meters calibration and/or testing.*

**Key words:** theory of gas-dynamic similarity, Reynolds number, natural gas flowmeter, test, calibration.

**Т**ехнічна можливість калібрування та повірки засобів вимірювальної техніки в умовах, що максимально наближені до експлуатаційних, існує не завжди. Тому виникає потреба вибору між доступними альтернативами і плануванням проведення калібрування і повірки із пристосуванням до конкретних умов. Одним із варіантів вирішення поставленого завдання в процесі калібрування та повірки засобів вимірювальної техніки є застосування теорії подібності газодинамічних процесів, що мають місце в проточній частині лічильника газу, враховуючи при цьому його конструктивні особливості, геометричні розміри та фізичні параметри плинного середовища.

Під час проведення калібрування лічильників великого діаметра часто доводиться звіряти його покази з показами двох чи більше еталонних лічильників меншого діаметра. При цьому для отримання результатів калібрування користуються умовою рівності сумарної об'ємної витрати еталонних лічильників та робочого засобу вимірювання, що калібрується. Таке припущення є помилковим для реального газового середовища [1]. Тому для

отримання коректних результатів необхідно користуватися умовою рівності не об'ємної, а масової витрати та основами теорії подібності, що визначаються чотирма моментами [2]:

- геометричною подібністю, тобто подібністю поверхонь взаємодії між моделями, що розглядаються, та середовищем;
- фізичною подібністю середовища, тобто подібністю полів та фізичних констант;
- подібністю граничних умов, що визначаються подібністю початкових та граничних умов;
- рівністю визначальних критеріїв.

Для турбінних лічильників, які широко використовують у процесі обліку природного газу, під час визначення критеріїв подібності центральне місце посідає характеристика режиму течії безпосередньо на профілі турбіни, яка є чутливим елементом лічильника.

Збереження подібності передбачає рівність не тільки відносних однойменних фізичних величин в обох потоках, але й будь-яких безрозмірних комплексів, складених на їх основі.

Під час проведення аналізу розмірностей, а також для визначення динамічної подібності між різними експериментальними випадками руху потоку у задачах гідродинаміки використовують число Рейнольдса.

Число Рейнольдса – безрозмірне число, яке залежить від швидкості потоку газу, характерного лінійного розміру та властивостей газу [4]. Для газу з густиною  $\rho$  і динамічною в'язкістю  $\mu$ , що протікає через поперечний переріз діаметром  $D$  зі швидкістю  $v$ , число Рейнольдса  $Re$  визначаємо таким чином:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (1)$$

Концепція динамічної подібності визначає, що за умови рівних чисел Рейнольдса потоків тіло в них піддаватиметься аналогічним впливам середовища. У випадку з турбінним лічильником мова йде про однакову швидкість обертання турбіни в потоці.

Для розрахунків як лінійний розмір для лічильників газу було прийнято гідравлічний діаметр  $D_r$  проточної частини лічильника [1], який визначаємо за формулою:

$$D_r = \frac{4 \cdot S_{3M}}{P_{3M}}, \quad (2)$$

де  $S_{3M}$  – площа поперечного перерізу потоку в проточній частині лічильника;  $P_{3M}$  – змочений периметр проточної частини лічильника.

Для визначення числа Рейнольдса на чутливому елементі турбінного лічильника акцент у дослідженні робили саме на перерізі турбіни.

Відповідно до рівняння нерозривності потоку масова витрата за усталеного режиму руху плинного середовища є сталою величиною [1, 3]:

$$G = G_1 + G_2 + \dots + G_i \quad (3)$$

де  $G$  – масова витрата плинного середовища через робочий засіб вимірювання;  $G_i$  – масова витрата плинного середовища через  $i$ -тий еталонний лічильник;  $i=1, 2, \dots, n$  – кількість еталонних ліній, що задіяні в процесі калібрування робочого засобу вимірювальної техніки.

Беручи до уваги, що

$$G = \rho Q \quad (4)$$

а

$$Q = \frac{Re \mu S_{3M}}{v D_r} \quad (5)$$

із (3) отримаємо рівність:

$$\frac{\mu}{4} Re P_{3M} = \frac{\mu}{4} \cdot Re_1 P_{3M1} + \frac{\mu}{4} Re_2 P_{3M2} + \dots + \frac{\mu}{4} Re_i P_{3Mi} \quad (6)$$

Приймаємо, що калібрування відбувається з використанням одного і того ж середовища з однаковими параметрами температури і тиску, отже, обидві сторони рівності (6) можна скоротити на величину константи  $\mu/4$ . Отримаємо вираз:

$$Re P_{3M} = \sum_{i=1}^n Re_i P_{3Mi} \quad (7)$$

**Вираз (7) є базовим і описує умову коректної процедури калібрування робочих лічильників, які відносяться від еталонних за типорозміром.**

Для апробації цього виразу на конкретному прикладі було виконано розрахунки залежності параметра  $(Re \cdot P_{3M})$  від витрати, заданої відповідно до паспортних даних різних моделей турбінних та ультразвукових лічильників. Розрахунки проводили для природного газу як робочого середовища калібрування при тиску 1 атм та температурі 0°C. Геометричні розміри знято безпосередньо з турбінних лічильників DN 400 G6500, двох лічильників різних виробників DN 200 – G1000 та G1600, а також ультразвукових лічильників типорозмірами DN 400 та DN 200. Прийнято, що еталонні лічильники DN 200 та лічильник DN 400, який повіряється, підключено паралельно і тиск потоку в кожній вимірювальній лінії однаковий.

Результати представлено у вигляді графіків (рис. 1). Накладання графіків залежності  $(Re \cdot P_{3M})=f(Q)$  в одну лінію констатує коректність умов подібності впливу середовища на робочі елементи проточної частини лічильника.

На рис. 2 представлено умови, за яких можливе проведення калібрування робочого засобу вимірювання техніки (ЗВТ) за допомогою двох еталонних лічильників. З рис. 2 видно, що у разі дотримання необхідних умов калібрування рівняння (7) виконується.

Додатково було проведено розрахунок параметра  $(Re \cdot P_{3M})$  для тиску 9 атм при температурі 5°C для лічильника DN400 на витраті 200 м³/год, а також DN200 на витраті 100 м³/год та пари лічильників DN200, сума витрати яких також становить 200 м³/год.

Із результатів розрахунку (див. рис. 2) стає очевидно, що у випадку калібрування робочого ЗВТ кількома еталонними лічильниками необхідно дотримуватися вимог умови (7). В іншому випадку зростає значення невизначеності вимірювання.

В Україні для перевірки та калібрування лічильників газу використовують установки, які працюють на робочому середовищі – повітря, за тиску близького до атмосферного. Зокрема, такі установки знаходяться на підприємствах: ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» (м. Івано-Франківськ), ТОВ «СКБ ЗА» (м. Івано-Франківськ), ТОВ «Газтронік» (м. Івано-Франківськ), ІТОВ «Темпо» (м. Івано-Франківськ), СП «Радміртех» (м. Харків), ВКФ «Курс» (м. Дніпропетровськ). Однак використання природного газу як робочого середовища забезпечує максимальне наближення умов калібрування до умов експлуатації лічильників. ПАТ «Івано-Франківськгаз» у калібрувальній лабораторії «Пасічна» має змогу проводити калібруван-

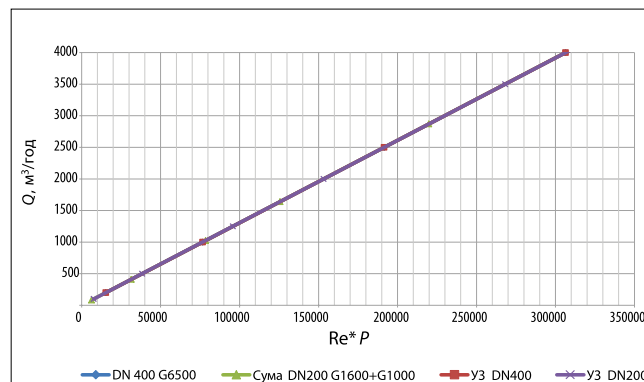
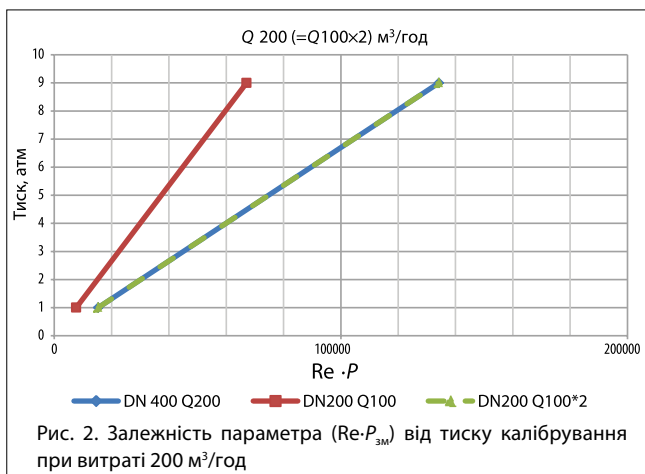


Рис. 1. Залежність параметра  $(Re \cdot P)$  від витрати  $(Q)$  для лічильників природного газу

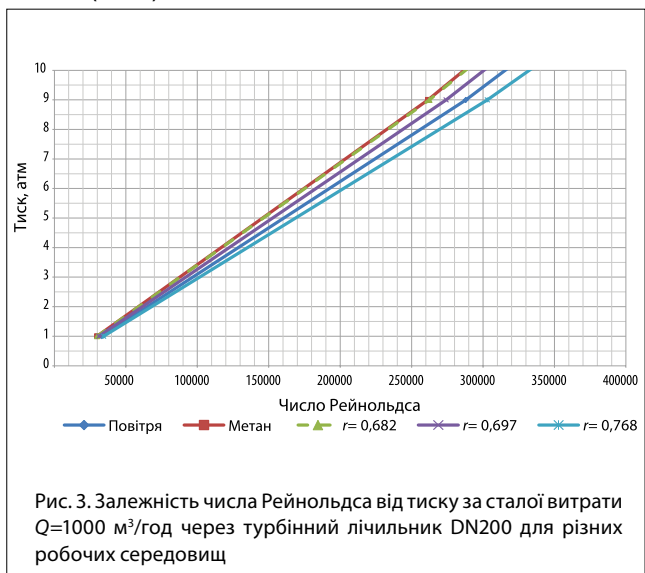


ня з використанням природного газу у діапазоні робочих тисків газу від 0,1 до 0,6 МПа. Калібрування на природному газі на високому тиску (до 5,5 МПа) в Україні можливе після введення Метрологічного центру Національної акціонерної компанії «Нафтогаз України» (м. Боярка) в експлуатацію.

Більшість європейських калібрувальних стендів для лічильників, що працюють в умовах високого тиску, як робоче середовище використовують природний газ. Разом із тим у провідних метрологічних інститутах Європи та Канади є стенди, на яких як робоче середовище використовують повітря при високому тиску [5]. Аналіз роботи цих стендів показав їх ефективність та високі результати калібрування за умови коректного застосування теорії газодинамічної подібності.

Головною відмінністю між повітрям та природним газом є в'язкість середовища та його густина. Значення відношення  $Re_{\text{повітря}}/Re_{\text{пр. газу}}$  показує, що при атмосферному тиску за однакової швидкості потоку значення числа Рейнольдса повітря на 11,5 % вище, ніж природного газу. Зі зростанням тиску відмінність між повітрям та природним газом зменшується.

Розглядаючи значення числа Рейнольдса для різних калібрувальних середовищ за рівних тисків калібрування, можемо дійти висновку, наскільки вони, а відтак, і покази лічильника, калібровані на природному газі або повітрі **без дотримання умови подібності**, будуть різнитися (табл.).



Таблиця

Порівняння властивостей калібрувальних середовищ ( $20^\circ\text{C}$ )

Середовище	Природний газ			Повітря			Відношення
	Тиск, бар(а)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu$ , мкПа·с	$Re^*$	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu$ , мкПа·с	
1,01325	0,6812	11,095	26236	1,20416	17,587	29256	1,115
9	6,2230	11,203	237347	10,86983	17,696	262461	1,106
21	14,8455	11,400	556427	25,45704	17,887	608118	1,093
50	37,2545	12,067	1319158	60,95595	18,468	1410308	1,069

\* Число Рейнольдса розраховано для витрати середовища  $Q=1000 \text{ м}^3/\text{год}$  та номінального діаметра DN 200.

Ця особливість турбінних лічильників знайшла своє відображення в міжнародних нормативних документах, де суворо регламентуються умови, за яких відбувається калібрування лічильників цього типу. Міжнародна організація законодавчої метрології (OIML), Європейський комітет зі стандартизації (CEN) та Американська газова асоціація (AGA) в своїх документах наголошують на важливості проведення калібрування турбінних лічильників газу за умов, максимально наближених до експлуатаційних [7–9], або умов, що моделюють умови експлуатації (із дотриманням критеріїв подібності).

Так, рекомендації міжнародної організації законодавчої метрології OIML R137-1&2 регламентують:

«Вимоги точності п. 5.3 та 5.4 мають бути перевірені за параметрів газового середовища, максимально наближених до умов експлуатації (тиск, температура, тип газу) лічильника після його введення в експлуатацію.

Перевірку також може бути виконано з типом газу (наприклад, повітря), відмінним від того, для якого лічильник призначений для використання, якщо органи влади, відповідальні за перевірку(верифікацію), переконані, що зівставні результати будуть отримані шляхом оціночних випробувань із різними газами (п.1.2.5.2.3) або технічною конструкцією лічильника, що перевіряється» [8].

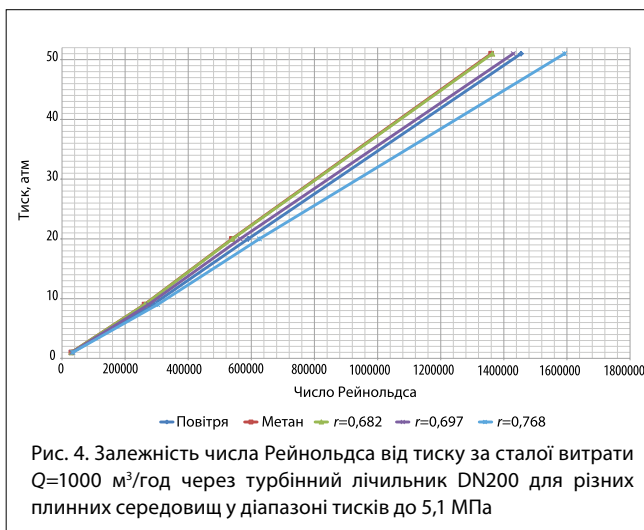
AGA Report No. 7. Measurement of Natural Gas by Turbine Meter (AGA 7 Вимірювання природного газу турбінним лічильником) констатує:

- «дослідження показали, що експлуатаційні характеристики турбінних лічильників змінюються зі зміною витрати та робочого тиску. Ці зміни пов'язані зі зміною значення числа Рейнольдса, а в деяких випадках і густини та особливо важливі при низьких і перехідних робочих тисках і витратах (розділ 6.3.1);

- калібрування лічильника, проведене на випробувальному стенді в певному діапазоні чисел Рейнольдса, характеризує експлуатаційні параметри лічильника, якщо він використовується для вимірювання кількості газу в тому ж діапазоні чисел Рейнольдса (розділ 6.3.1.1);

- очікуваний робочий діапазон числа Рейнольдса та/або густини для лічильника необхідно враховувати під час розробки програми калібрування» [7].

З метою визначення залежності впливу величини тиску на число Рейнольдса для різних плинних середовищ нами розроблено методику проведення розрахунків числа Рейнольдса залежно від фізичних параметрів плинного середовища для різних значень витрат.



Цей розрахунок дає змогу простежити зміну робочого тиску для заданої витрати під час калібрування лічильників на різних робочих середовищах, а саме: природному газі з різним компонентним складом, повітрі або метані, за умови сталого числа Рейнольдса (рис. 3). Для розрахунків було підібрано варіанти складу газу за принципом мінімальної, середньої та максимальної густини з різних регіонів України (дані з офіційного сайту ПАТ «Укртрансгаз»). Результати розрахунку у вигляді графіків залежностей числа Рейнольдса від тиску для

## Список використаних джерел

1. **Чарный И.А.** Основы газовой динамики / И.А.Чарный. – М.: «Гостоптехиздат», 1961. – 221 с.
2. **Шнеэ Я.И.** Газовые турбины. Ч.1. Термодинамические процессы и теплообмен в конструкциях / Я.И.Шнеэ, В.М. Капинос, И.В. Котляр. – К.: Вища школа, 1979. – 296 с.
3. **Андрішшин М.П.** Облік природного газу: довідник / М.П. Андрішшин, О.М. Карпаш, Я.С. Марчук, І.С. Петришин, О.Є. Середюк, С.А. Чеховський. – Івано-Франківськ: ПП «Сімік», 2008. – 160 с.
4. **Андрішшин М.П.** Газ природний, палива та оливи: монографія / М.П. Андрішшин, Я.С. Марчук, С.В. Бойченко, Л.А. Рябоконь. – Одеса: Астропринт, 2010. – 232 с.
5. **Щупак І.В.** Сучасні підходи до вимірювання об'єму та об'ємної витрати природного газу / І.В. Щупак, О.М. Чернишенко, Н.М. Андрішшин, Р.З. Негреба // Нафтогазова галузь України. – 2014. – № 5. – С 39–41.
6. **ДСТУ EN 12261:2006** Лічильники газу турбінні. Загальні технічні умови. – К.: Держстандарт України, 2006. – 32 с.
7. **AGA Report No. 7.** Measurement of Natural Gas by Turbine Meter (2006).
8. **OIMLR 137-1&2: 2012 (E)** Gas meters. Part 1: Metrological and technical requirements. Part 2: Metrological controls and performance tests.
9. **Paul W.Tang**, M.Sc., P.Eng., «Pressure Effect on Turbine Meter Gas Flow Measurement». Fortis BC Energy, Surrey, Canada, 2012.

природного газу з різним компонентним складом, метану та повітря представлено на рис. 3–4.

Отже, з графіків стає зрозуміло, що під час проведення процедури калібрування вкрай важливо враховувати фізичні параметри та склад робочого середовища. **За умови додержання принципів газодинамічної подібності однакове значення витрати для різних типів газів досягається за різних тисків.**

## Висновки

1. Калібрування або перевірку лічильників газу можна проводити на робочому середовищі, відмінному від середовища його експлуатації, за умови газодинамічної подібності (однакових значень числа Рейнольдса). Цього можна досягти шляхом варіації величини тиску робочого середовища калібрування за сталої або однакової витрати.

2. Для отримання коректних результатів калібрування робочого засобу вимірювання з геометричними розмірами, що відрізняються від розмірів еталонних лічильників, необхідно користуватися умовою рівності сумарної масової витрати (закон збереження маси для усталеного режиму руху реального газу) та умовами газодинамічної теорії подібності (рівність 7).

3. Міжнародні та європейські стандарти визначають можливість проведення калібрування та перевірки на повітрі, природному газі або будь-якому іншому газі за умови, що цей газ приводить до подібних метрологічних результатів (число Рейнольдса визначено умовами вимірювання).

## Введено в експлуатацію видобувну платформу в Ірані

**Я**к повідомляє Natural Gas Europe, в Ірані на морському газоконденсатному родовищі Південний Парс введено в експлуатацію нову видобувну платформу, як і передбачалося етапом 14 розробки цього родовища.

Геологічні запаси природного газу родовища Південний Парс, розробка якого розділена на 29 етапів або фаз, оцінюють у 51 трлн м<sup>3</sup>. Воно займає площу 9,7 тис. км<sup>2</sup>, із яких 3,7 тис. км<sup>2</sup> знаходиться в територіальних водах Ірану в Перській затоці, а решта (6 тис. км<sup>2</sup>) розташована в територіальних водах Катару.

Зараз Іран видобуває близько 700 млн м<sup>3</sup> на добу і планує до кінця 2018 року довести видобуток до 1,1 млрд м<sup>3</sup> на добу.

За матеріалами <http://oil-gas-energy.com.ua>