

УДК 681.121

УРАХУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОЧОГО СЕРЕДОВИЩА ЗА ЗАСТОСУВАННЯ ТУРБІННИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

А. Рак, аспірант, кафедри приладобудування,

І. Коробко, доктор технічних наук, професор, кафедри,

В. Кроте́вич, аспірант, кафедри

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,

І. Щупак, кандидат технічних наук, начальник відділу метрології та газовимірювань,

ПАТ «Укргазвидобування», м. Київ

Розглянуто фізико-технічні засади вимірювання об'єму та об'ємної витрати природного газу на основі тахометричного методу із застосуванням турбінного перетворювача витрати. Узагальнено наявні відомості стосовно сучасного стану та проблем експлуатації засобів вимірювання витрати турбінного класу для реєстрації плин природного газу за їх калібрування на робочому середовищі — повітря за атмосферного тиску. На основі теорії гідрогазодинаміки та напівнатурних досліджень окреслено комплексний критерій подібності робочих середовищ за умов повірки та експлуатації, використання якого дозволяє встановити метрологічні характеристики турбінних лічильників природного газу за результатами їх зазначеного калібрування.

Physical and technical backgrounds of natural gas volume and volume flow measurements on the base of tachometric method by mean of turbine flow meter are considered in the work. Available data about current stage and problems of using of turbine flow measuring instruments calibrated by air as working medium for registration of natural gas flow are generalized. On the base of gas hydrodynamics theory and HIL studies the complex criterion of working mediums similarity under verification and operation which is the ground for determination of turbine gas meters calibrated by air under atmospheric pressure as working media metrological characteristics was sketched.

Ключові слова: витрата, природний газ, повітря, калібрування, турбінний лічильник, метрологічні характеристики.

Keywords: flow, natural gas, air, calibration, turbine gas meter, metrological characteristics.

Турбінні вимірювальні перетворювачі витрати газу завдяки високій точності, відносно малій інерційності та відносно нескладній конструкції отримали широке застосування у вітчизняній та світовій метрологічній практиках для вирішення цілого спектра задач реєстрації об'єму та об'ємної витрати газу [1—3].

Як правило, засоби комерційного обліку природного газу проходять повірку (калібрування) на повірочних стендах із використанням як вимірюваного середовища повітря за тиску, близького до атмосферного, а застосовуються для обліку природного газу з різними значеннями тиску, що зазвичай значно перевищують величину атмосферного [4].

Унаслідок відмінностей фізичних властивостей повітря і природного газу та умов калібрування і застосування приладів виникають додаткові невизна-

ченості результатів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу. Це визначає актуальність проведення досліджень впливу зміни фізичних властивостей робочих середовищ за калібрування й експлуатації приладів.

Мета статті — аналіз результатів дослідження модернізованого лічильника природного газу турбінного класу, каліброваного на робочому середовищі — природному газі й повіреного на робочому середовищі — повітрі за атмосферного тиску, а також розроблення комплексного показника подібності газових потоків за калібрування приладів турбінного класу на повітрі й застосування їх за реальних умов експлуатації із плинним природним газом на основі гідрогазодинамічної теорії.

У міжнародній метрологічній практиці наявні нормативні документи, що жорстко регламентують

вимоги до калібрування лічильників турбінного класу [5]. Варто зазначити, що документ [5] імплементовано в Україні й чинний як національний стандарт [6].

У першу чергу ці вимоги зумовлені тим, що експлуатаційні (в тому числі й метрологічні) характеристики лічильників газу турбінного класу залежать від їх конструкції, тиску та витрати вимірюваного середовища, що пов'язано зі змінами їхніх інерційних властивостей, серед яких важливе значення мають зміни густини та динамічної в'язкості [7, 8].

На сьогодні в Україні випробування та калібрування лічильників турбінного класу за умов їх експлуатації за робочого тиску вимірюваного середовища, вищого за 0,4 МПа, повинні виконуватися за тиску робочого середовища, близького до передбачуваного робочого тиску під час їх експлуатації [9].

Основні вимоги зазначених вище нормативних документів такі [10]:

- калібрування лічильника, виконане на випробувальному стенді у певному діапазоні чисел Рейнольдса, характеризує експлуатаційні параметри приладу, якщо його використовують для вимірювання кількості газу в тому ж діапазоні чисел Рейнольдса. Очікуваний робочий діапазон числа Рейнольдса та/або густини для лічильника необхідно враховувати під час розроблення методики калібрування [11];
- вимоги до точності мають бути перевірені за параметрів газового середовища (тиску, температури, типу газу), максимально наближених до умов експлуатації лічильника. Перевірку також може бути виконано із типом газу (наприклад, повітрям), відмінним від того, для реєстрації якого призначений лічильник, якщо органи влади, відповідальні за перевірку (верифікацію), переконані, що зіставні результати отримуватимуться шляхом оціночних випробувань із різними газами або технічною конструкцією лічильника, що перевіряється [5,6].

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Процедура повірки (калібрування) турбінних лічильників газу на повітрі за умов, близьких до стандартних, унаслідок відсутності калібрувальних установок з робочим середовищем — природним газом, — поширена практика в Україні [12]. Як безрозмірний критерій гідрогазодинамічної подібності за калібрування зазвичай використовують число Рейнольдса Re , що є мірою відношення між силами інерції рухомого потоку і тертя та залежить від швидкості потоку вимірюваного середовища v , ха-

рактерного лінійного розміру D і фізичних властивостей потоку [13]:

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

де ρ , μ — густина і динамічна в'язкість робочого середовища, відповідно.

Згідно з теорією гідрогазодинамічної подібності такий підхід означає, що за умови однакових чисел Рейнольдса для різних потоків один і той самий чутливий елемент (ЧЕ), який занурено у вимірюваний потік, піддаватиметься наближено однаковим впливам робочого середовища. Із цього випливає припущення щодо однакової кутової швидкості його обертання ω внаслідок однакової відносної кількості кінетичної енергії плинного газу [14].

У загальному випадку число Рейнольдса характеризує відношення сил інерції потоку до гальмівних сил, а відтак, обчислене для перерізу вимірювальної камери, залежить від впливу гідрогазодинамічного опору ЧЕ. Отже, за визначення числа Рейнольдса для конкретного турбінного лічильника, як характерний лінійний розмір необхідно враховувати аеродинамічний профіль ЧЕ (кількість та кут атаки лопатей, зовнішній та внутрішній радіуси турбіни), параметри спрямляча потоку тощо. Практичний досвід авторів статті свідчить, що зазначені вище геометричні параметри не надаються жодним із виробників турбінних витратомірів, їх вимірювання найчастіше неможливе, а тому за реальних досліджень обчислення точного значення числа Рейнольдса є складним завданням.

Обов'язкові до врахування також гальмівні моменти протидії, зумовлені не лише параметрами конструкції конкретного лічильника (тертям у підшипникових опорах, моментом опору відлікового механізму тощо), але й газодинамічними властивостями вимірюваного середовища.

Зважаючи на викладене вище, маємо ще одне практичне завдання, що полягає у визначенні мінімального значення витрати (нижньої межі динамічного вимірювального діапазону) за параметрів вимірюваного середовища, відмінних від тих, за яких проведено калібрування. Практичні дослідження засвідчили, що нижня межа вимірювального діапазону є змінною характеристикою і різниться залежно від вимірюваного середовища та робочого тиску.

Частина виробників турбінних лічильників у технічній документації наводить рекомендації у виді напівемпіричних виразів для перерахунку мінімальної витрати Q_{\min} залежно від впливних параметрів, наприклад, робочого тиску та відносної

густини вимірюваного середовища [15]:

$$Q_{\min, HP} = Q_{\min, LP} \cdot \frac{1}{\sqrt{d_v \cdot p}}, \quad (2)$$

де $Q_{\min, HP}$ — межа мінімальної витрати для високого тиску, $Q_{\min, LP}$ — межа мінімальної витрати для низького тиску, d_v — відносна густина газу (для природного газу $d_v = 0,65 \text{ кг/м}^3$), p — абсолютний робочий тиск (бар). Але такі рекомендації надаються виробниками достатньо рідко, а подібні залежності зазвичай не мають загального характеру і фактично прив'язані до конструктивних особливостей лічильника та умов калібрування (експлуатації). Це унеможливує їх використання для широкого кола різноманітних турбінних перетворювачів витрати.

Не менш важливою особливістю вирішувано-го завдання є те, що у переважній більшості конструкцій турбінних лічильників вимірювальна інформація отримується після ланки перетворень у виді дискретних імпульсів, частота надходження яких пропорційна інтегрованій у часі об'ємній витраті (об'єму). Це ускладнює цифрове опрацювання сигналу, оскільки фізично первинним вимірювальним параметром для турбінного лічильника є кутова швидкість обертання турбіни ω , пропорційна усередненій швидкості переміщення відповідної кількості газу крізь поперечний переріз вимірювальної камери [13].

З метою виявлення особливостей застосування засобів вимірювання, які пройшли калібрування на повітрі з тиском, рівним атмосферному, проведено експериментальні дослідження модернізованого турбінного лічильника типорозміру G250, межі витрати якого становлять: $Q_{\min} = 13 \text{ м}^3/\text{год}$; $Q_{\max} = 400 \text{ м}^3/\text{год}$ (рис. 1) [16].

Модернізація полягала у заміні стандартного механічного відлікового пристрою електронним сенсором положення ЧЕ, що забезпечило перетворення кутової швидкості його обертання у цифровий кодовий сигнал. При цьому геометричні параметри ЧЕ та конфігурація проточної частини вимірювальної камери не змінювалися. Таке технічне рішення надало можливість розвантажити ЧЕ шляхом нівелювання впливу гальмівного моменту кінематики відлікового механізму та отримувати вихідну інфор-

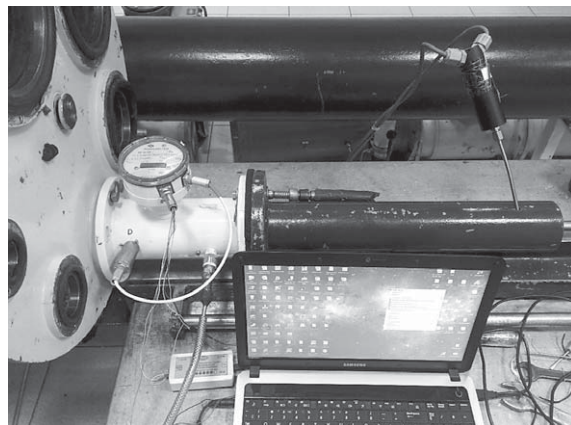


Рис. 1. Калібрування модернізованого лічильника на повітрі за тиску, близького до атмосферного
Fig. 1. Modernized meter calibration at air with pressure close to atmospheric

мацію у цифровому виді, що разом з електронним блоком лінеаризації використано для коригування коефіцієнта перетворення у всьому динамічному діапазоні вимірювання.

Отримані результати випробувань окреслили достатньо прийнятну збіжність результатів калібрування на повітрі за атмосферного тиску та природному газі з надлишковим тиском 0,262 та 0,444 МПа у діапазоні чисел Рейнольдса, більших за $2 \cdot 10^4$ (рис. 2).

Це відповідає нижній межі перехідного режиму течії. За ламінарної течії відносне відхилення може сягати до 10 %, що неприйнятно. Очевидні також відмінності роботи ЧЕ на малих витратах, які в першу чергу залежать від особливостей роботи підшипникових опор. Починаючи зі значень чисел Рейнольдса, більших за $1,8 \cdot 10^4$, на метрологічні

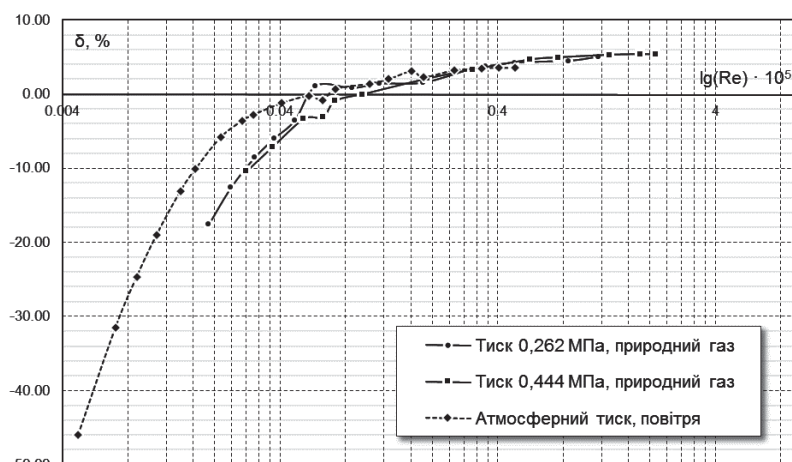


Рис. 2. Результати калібрування (без поправок та лінеаризації) модернізованого турбінного лічильника за різних робочих тисків природного газу і повітря за атмосферного тиску
Fig. 2. Calibration results (without amendments and linearization) of modernized turbine meter for different working pressures of natural gas and air at atmospheric pressure

характеристики первинного перетворювача практично не впливає в'язкість вимірюваного середовища. Цей висновок корелюється із твердженнями, викладеними у роботах [14, 17].

Оцінивши результати калібрування лічильника на повітрі за тиску, близького до атмосферного, та двох робочих тисків на природному газі (0,262 МПа та 0,444 МПа) (рис. 3), можна зробити висновок, що діапазон швидкостей обертання ЧЕ за калібрування лічильника на повітрі повністю перекриває діапазони швидкостей обертання ЧЕ на природному газу за двох зазначених вище тисків.

Необхідно зазначити, що діапазон витрати, який відповідає числам Рейнольдса $Re \geq 5 \cdot 10^4$, фактично є некаліброваним, оскільки за робочих умов під час калібрування на повітрі містився вище значен-

ня Q_{max} . Тобто отримання залежності $\omega = f(Re)$ ґрунтується на використанні екстраполяційних методів для прогнозування калібрувальної кривої, отриманої на повітрі як робочому середовищі, та за припущення лінійності кривої перетворення лічильника в діапазоні його максимальної витрати у межах допустимих швидкостей потоку технологічної магістралі.

Такі результати не відкидають використання гідродинамічного критерію подібності Рейнольдса в цілому, але для вирішення завдання вимірювання об'єму та об'ємної витрати природного газу за високих значень робочого тиску під час калібрування (повірки) турбінного лічильника на повітрі за атмосферного тиску, особливо у діапазоні чисел Рейнольдса, що відповідають ламінарному та пере-

хідному режимам течії, цього вочевидь недостатньо (рис. 4).

Отримані результати дозволяють здійснити наближене оцінювання меж відповідності градуювальних характеристик лічильника турбінного класу за різних параметрів вимірюваного середовища.

У сучасній літературі наявні два підходи до описання роботи турбінного вимірювального перетворювача. Перший підхід описує крутильний момент, що створюється потоком з точки зору зміни імпульсу сили, а другий — роботу турбіни з точки зору аеродинамічної підйомної сили з використанням кінетичної газової аеродинамічної теорії. Перевага першого підходу полягає в тому, що він дозволяє легко отримати аналітичні результати, які описують основні принципи, деякі з яких не піддаються аеродинамічному аналізу. До переваг другого підходу можна віднести більш повне математичне описання процесу з меншим використанням припущень та наближень [18].

Для поглибленого аналізу модернізованого лічильника використано безрозмірний комплекс подібності, складений на основі математичної моделі

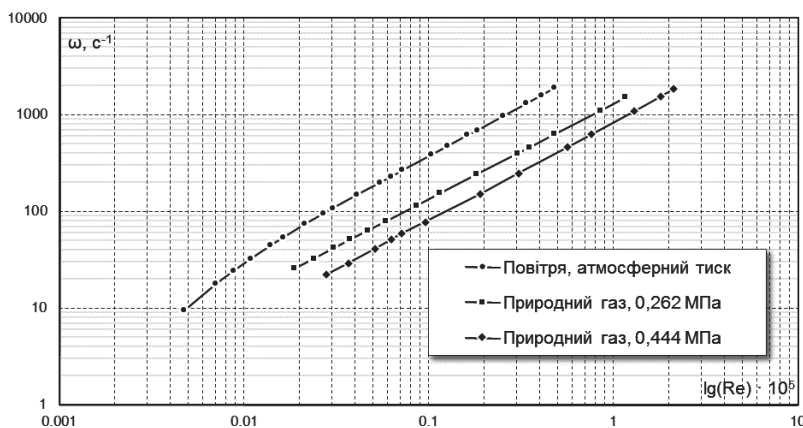


Рис. 3. Залежність кутової швидкості обертання турбіни від числа Рейнольдса за різних робочих тисків для природного газу та повітря за атмосферного тиску

Fig. 3. The dependence of the angular velocity of turbine rotation due to Reynolds number for different working pressures for natural gas and air at atmospheric pressure

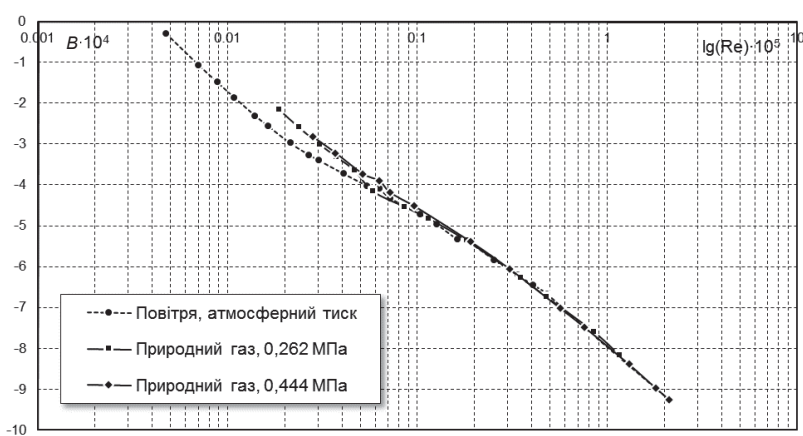


Рис. 4. Різниця значень відносної похибки лічильника від отриманих під час калібрування на повітрі за атмосферного тиску та природному газі за тисків 0,262 МПа та 0,444 МПа відносно числа Рейнольдса

Fig. 4. Differences of meter relative error values obtained by calibration with air at atmospheric pressure and natural gas at pressures of 0.262 MPa and 0.444 MPa relatively to Reynolds number

з урахуванням реальних конструктивних розмірів ЧЕ та вимірювальної камери [2, 18]:

$$\frac{\omega}{Q} = \frac{\operatorname{tg} \beta}{rA} - \frac{0,036n(R+a)SA^2 \operatorname{Re}^{-0,2} \sin \beta}{\bar{r}^2}, \quad (4)$$

де ω — кутова швидкість обертання турбіни; Q — об'ємна витрата; β — кут атаки лопатей; A — кільцева площа поперечного перерізу проточної частини вимірювальної камери на перерізі ЧЕ; n — кількість лопатей ЧЕ; R, a — радіуси поверхні маточини і зовнішньої поверхні ЧЕ, відповідно; S — довжина лопаті у проекції на вісь обертання; $\bar{r} = \sqrt{\frac{R^2 + a^2}{2}}$ — середньоквадратичний радіус ЧЕ.

Після підстановки у вираз (3) числових значень конструктивних параметрів і перетворення отримаємо безрозмірний комплекс подібності як функцію числа Re , кутової швидкості обертання турбіни ω та об'ємної витрати Q :

$$B = \left[M - \frac{\omega}{Q} \right] \cdot \frac{1}{\operatorname{Re}^{-0,2}}, \quad (4)$$

де $M = \frac{\operatorname{tg} \beta}{rA}$ — константа для певного турбінного лічильника, що визначається його геометричними параметрами.

В ідеальному випадку, коли відсутня низка впливних чинників, які уповільнюють рух турбіни, значення коефіцієнта B залежатиме виключно від параметрів конструкції елементів турбінного лічильника і може бути описано залежністю (рис. 5):

$$B = \frac{0,036n(R+a)SA^2 \sin \beta}{\bar{r}^2}. \quad (5)$$

Унаслідок сукупних гідродинамічних впливів для турбінного лічильника за реальних умов експлуатації значення безрозмірного коефіцієнта B , визначені за виразами (4) і (5) відрізнятимуться на вели-

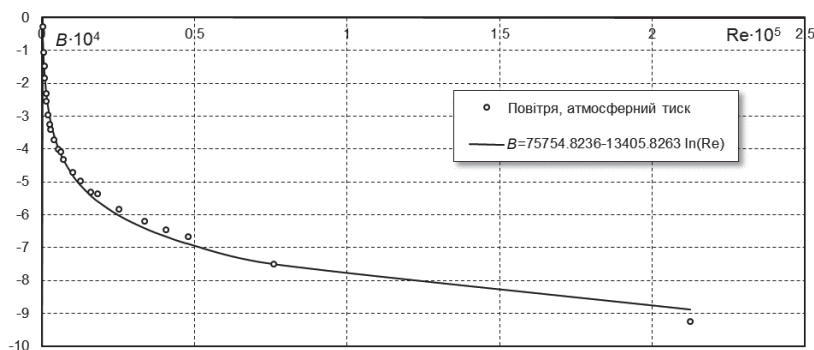


Рис. 5. Залежність безрозмірного комплексу B від числа Рейнольдса, отримані за калібрування на повітрі за атмосферного тиску та природному газі за тисків 0,262 МПа та 0,444 МПа

Fig. 5. Dependence of dimensionless complex B from Reynolds number obtained by calibration with air at atmospheric pressure and natural gas at pressures of 0.262 MPa and 0.444 MPa



Рис. 6. Алгоритм розв'язання задачі
Fig. 6. Algorithm for the problem solving

чину, пропорційну похибці приладу. При цьому дійсні значення числа Рейнольдса та об'ємної витрати, що проходить крізь лічильник, можна визначити шляхом ітераційних наближень за розробленим алгоритмом (рис. 6).

У процесі виконання обчислень за запропонованим алгоритмом вираз для залежності $B(\operatorname{Re})$ отримують шляхом апроксимації кривої $B(\operatorname{Re})$, отриманої для повітря з використанням методів регресійного аналізу (наприклад, методу найменших квадратів).

Варто зазначити, що достовірність результатів значною мірою залежить від точності апроксимації вихідної кривої $B(\operatorname{Re})$, отриманої на повітрі (рис. 7).

Отриману інтерполяційну залежність (рис. 7) можна охарактеризувати двома параметрами: індексом кореляції R (детермінації R^2) та середньою похибкою апроксимації \bar{A} :

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (B_i - \hat{B}_i)^2}{\sum (B_i - \bar{B})^2}}; \quad (6)$$

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{B_i - \hat{B}_i}{B} \right| \cdot 100 \%, \quad (7)$$

де n — кількість спостережень.

Для інтерполяційної кривої (рис. 7), за виразами (6) та (7) отримано значення: $R \approx 0,9954$; $R^2 \approx 0,9909$; $\bar{A} \approx 11,806 \%$.

Аналізуючи значення відносної похибки лічильника, отримані моделюванням за допомогою безрозмірного комплексу $B(Re)$ (рис. 8) та шляхом калібрування (рис. 3), можна визначити дієвість запропонованого підходу для малих чисел Рейнольдса ($Re \leq 5000$), де за умов калібрування відносна похибка може сягати до 60%.

Спостерігаються також і недоліки використаної математичної моделі, що підтверджується графічними залежностями $B(Re)$ (рис. 5). Збіжність цих залежностей для більш повного математичного описання турбінного лічильника, що використовується

під час складання безрозмірних комплексів, має бути кращою.

Також потребує доопрацювання математичний апарат інтерполяції вихідної кривої безрозмірного комплексу $B(Re)$ (рис. 7). Це дозволить отримати результати із середньою похибкою апроксимації, не більшою за (1–2) %.

Запропонований підхід дозволяє з високою точністю прогнозувати метрологічні характеристики лічильників турбінного класу для різних газових вимірювальних середовищ, базуючись на результатах калібрування на будь-якому з них.

Аналізуючи зазначені вище міркування та на основі результатів проведених досліджень, можна констатувати що:

* розглянуту в роботі [12] проблему необхідності виконання вимог ДСТУ EN 12261:2006 щодо калібрування турбінних лічильників на високому тиску потрібно поширити на робочі тиски, менші від 0,4 МПа, та поставити питання відповідності густини потоку під час калібрування густини вимірюваного газу за робочих умов;

* у процесі калібрування та повірки на повітрі за умов, близьких до атмосферних, є сенс підвищувати верхню межу об'ємної витрати діапазону повірки відповідно до співвідношень густини газу за допустимих умов експлуатації.

* для швидкостей обертання ЧЕ за умов експлуатації, які містяться поза діапазоном Q_{max} під час калібрування (таке може бути за тиску газу, вищого за 0,16 МПа, і, відповідно, більшої густини газу за робочих умов, ніж має повітря за нормальних умов [19]), неможливо отримати пряме метрологічне підтвердження, тобто поширення масштабуванням підтверджених метрологічних результатів на цей діапазон витрати очікувано повинно відбуватися зі збільшенням дисперсії відхилень; звідси чинні методики повірки турбінних лічильників повинні бути переглянуті та відкориговані;

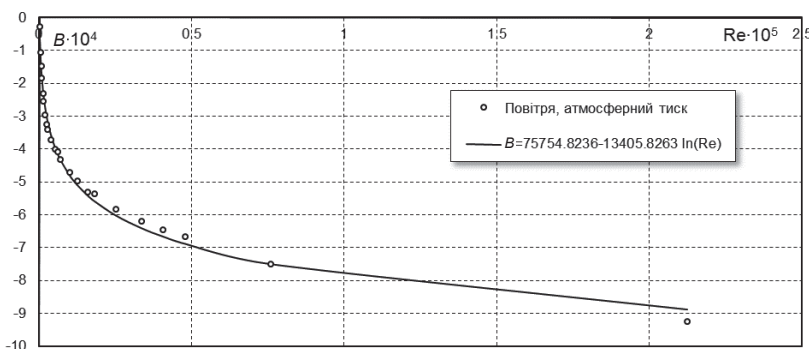


Рис. 7. Інтерполяційна крива для залежності $B(Re)$, отриманої на повітрі за тиску, близького до атмосферного

Fig. 7. Interpolation curve for the dependence $B(Re)$, obtained with air at pressure close to atmospheric

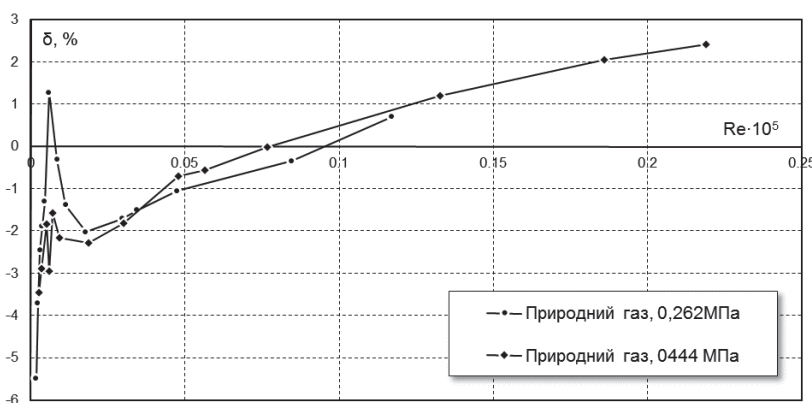


Рис. 8. Різниця значень відносної похибки лічильника від отриманих за результатами калібрування на повітрі за атмосферного тиску та перераховані для природного газу за тисків 0,262 МПа та 0,444 МПа відносно числа Рейнольдса за алгоритмом рис.6

Fig. 8. Differences of meter relative error values obtained from the results of calibration with air at atmospheric pressure and listed for natural gas at pressures of 0.262 MPa and 0.444 MPa relative to Reynolds number by algorithm Fig.6

* для підвищення точності результатів за використання безрозмірних комплексів, що базуються на гідрогазодинамічних критеріях, для більш детального врахування параметрів вимірюваного середовища перспективним є розширення їх переліку, наприклад, урахування чисел Ейлера, Фруда, Струхала тощо;

* додатково є сенс ставити питання розширення діапазонів вимірювання витрати лічильників природного газу турбінного класу за тисків, вищих за 0,16 МПа, звичайно у межах допустимих швидкостей потоку в технологічній магістралі.

ВИСНОВКИ


Проведені дослідження лічильника газу з електронним інтегральним датчиком положення ротора ЧЕ засвідчили монотонність та лінійність характеристики перетворення за невеликого систематичного відхилення убік завищення для каліброваного

го діапазону швидкостей обертання ЧЕ. За застосування для вимірювання об'єму та об'ємної витрати природного газу лічильника, каліброваного з робочим середовищем — повітрям, для визначення градуовальної характеристики можна використовувати запропонований критерій подібності, побудований на основі критерію Рейнольдса.

Подальші дослідження плануються у напрямку випробування лічильника на високому тиску, за вимірюваного середовища — природного газу, із калібрувальними характеристиками, отриманими на повітрі за нормальних умов, із уведенням до електронного блока лінеаризації алгоритмічних методів урахування умов експлуатації, в тому числі динамічної в'язкості газу, що у разі успіху дозволить відмовитися від проведення дороговартісної процедури калібрування (повірки) лічильника на природному газі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Власюк Я.М. Концепція єдиної системи обліку природного газу України (оптимізація впровадження промислових лічильників різних методів вимірювання) [Текст] / Я.М. Власюк, М.І. Чуприн. // Методи та прилади контролю якості (Vlasyuk Ya.M. Kontseptsiya yedynoyi systemy obliku pryrodnoho hazu Ukrainy (optimizatsiya vprovadzhennya promyslovykh lichyl'nykh riznykh metodiv vymiryuvannya) [Tekst] / Ya.M. Vlasyuk, M.I. Chupryn. // Metody ta prylady kontrolyu yakosti) — 2007. — № 18. — С/С. 73—75.
2. Ключко Н.Б. Удосконалення методів оцінювання точності турбінних лічильників газу: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.01.02 [Текст] / Н.Б. Ключко; Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. (Klochko N.B. Udoshkonalennya metodiv otsinyuvannya tochnosti turbinnnykh lichyl'nykh hazu: avtoref. dys. kand. tekhn. nauk: 05.01.02 [Tekst] / N.B. Klochko; Ivano-Frankiv. nats. tekhn. un-t nafty i hazu.) — 2014. — 20 с/с.
3. Хансуваров К.И. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара [Текст] / К.И. Хансуваров, В.Г. Цейтлин. — М.: Изд-во стандартов (Khansuvarov K.Y. Tekhnika yzmerenyua davlenyya, raskhoda, kolychestva u urovnya zhydkosty, haza u para [Tekst] / K.Y. Khansuvarov, V.H. Tseytlyn. — М.: Yzd-vo standartov), 1990. — 287 с/с.
4. Стеценко А.А. Обзор стендов калибровки газовых счетчиков на рабочей среде «природный газ» в странах СНГ [Текст] / А.А. Стеценко А.А. И.В. Руженцев, Ю.С. Глова, С.Д. Недзельский // Обработка інформації в складних технічних системах (Stetsenko A.A. Obzor stendov kalybrovki gazovykh schetchikov na rabochey srede «prirodnyy gaz» v stranakh SNG [Tekst] / A.A. Stetsenko A.A. I.V. Ruzhentshev, Yu.S. Hlova, S.D. Nedzel'skiy // Obrobka informatsiyi v skladnykh tekhnichnykh systemakh). — 2015. — № 6. — С/С. 135—139.
5. OIML R 137-1&2: 2012 (E) Gas meters. Part 1: Metrological and technical requirements. Part 2: Metrological controls and performance tests., American Gas Association (A.G.A.); Transmission Measurement Committee Report No. 7, «Measurement of Natural Gas by Turbine Meters», American Gas Association, Washington, D.C., April 2006.
6. ДСТУ OIML R 137-1-2:2014 Лічильники газу. Частина 1. Метрологічні та технічні вимоги. Частина 2. Методи підтвердження метрологічних та технічних характеристик (OIML R 137-1-2, edition 2012 + OIML R 137-1-2-Amendment 2014, IDT) (DSTU OIML R 137-1-2:2014 Lichyl'nyky hazu. Chastyna 1. Metrolohichni ta tekhnichni vymohy. Chastyna 2. Metody pidtverdzhennya metrolohichnykh ta tekhnichnykh kharakterystyk (OIML R 137-1-2, edition 2012 + OIML R 137-1-2-Amendment 2014, IDT)).
7. Андрієшин М.П. Облік природного газу: довідник [Текст] / М.П. Андрієшин, О.М. Карпаш, Я.С. Марчук, І.С. Петришин, О.Є. Середюк, С.А. Чеховський. Івано-Франківськ: ПП «Сімик» (Andriyishyn M.P. Oblik pryrodnoho hazu: dovidnyk [Tekst] / M.P. Andriyishyn, O.M. Karpash, Ya.S. Marchuk, I.S. Petryshyn, O.Ye. Seredyuk, S.A. Chekhov's'kyu. Ivano-Frankiv's'k: PP «Simyk»), 2008. — 160 с/с.

8. Extended Lee Model for the Turbine Meter & Calibrations with Surrogate Fluids, Flow Measurement and Instrumentation, 2012; 24: 71 — 82 Jodie G. Pope, John D. Wright, Aaron N. Johnson and Michael R. Moldover].
9. ДСТУ EN 12261:2006 «Лічильники газу турбінні. Загальні технічні вимоги» (DSTU EN 12261:2006 «Lichyl'nyky hazu turbinni. Zahal'ni tekhnichni vymohy»).
10. Андрієшин М.П. Особливості застосування газодинамічної теорії подібності в процесі калібрування та перевірки лічильників природного газу [Текст] / М.П. Андрієшин, О.М. Чернишенко, А.В. Едель // Нафтогазова галузь України (Andriyishyn M.P. Osoblyvosti zastosuvannya hazodynamichnoyi teoriiy podibnosti v protsesi kalibruvannya ta povirky lichyl'nykiv pryrodnoho hazu [Tekst]/ M.P. Andriyishyn, O.M. Chernyshenko, A.V. Edel' // Naftohazova haluz' Ukrayiny). — 2015. — №6(18) — С/С. 33—36.
11. American Gas Association (A.G.A.); Transmission Measurement Committee Report No. 7, «Measurement of Natural Gas by Turbine Meters», American Gas Association, Washington, D.C., April 2006.
12. Кузьменко Ю.В. Щодо перевірки витратомірів-лічильників на природному газі [Текст] / Ю.В. Кузьменко, В.В. Онушко, А.М. Рак, І.В. Щупак // Український метрологічний журнал (Kuz'menko Yu.V. Shchodo povirky vytratimiriv-lichyl'nykiv na pryrodnomu hazi [Tekst] / Yu.V. Kuz'menko, V.V. Onushko, A.M. Rak, I.V. Shchupak //Ukrayins'kyu metrolohichnyy zhurnal) — 2014. — №4. — С/С. 58—60.
13. Paul W.Tang, M.Sc., P.Eng., «Pressure Effect on Turbine Meter Gas Flow Measurement» [Текст] / Paul W. Tang, M.Sc., P.Eng., Fortis BC Energy, Surrey, Canada, 2013.
14. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник. Кн. 1. — 5-е изд., перераб. и доп. [Текст] / П.П. Кремлевский. — СПб.: Политехника (Kremlevskyy P.P. Raskhodomery y schetchyky kolychestva veshchestv: Spravochnyk. Kn. 1. — 5-e yzd., pererab. y dop. [Tekst] / P.P. Kremlov's'kyu. — SPb.: Polytekhnyka), 2002. — 409 с/s.
15. Elster-Instromet N.V. TRZ2 EN04 Datasheet. Turbine gas meters DN 50 — 150 for custody transfer: <http://www.gasas.cz/www/prilohy/plynom>].
16. Основні технічні характеристики лічильників газу ЛГ-К-Ех (Osnovni tekhnichni kharakterystyky lichyl'nykiv hazu LH-K-Ekh): <http://www.prylad.com.ua/index.php/uk/turbinni-lichyl'nyky/lh-k-ekh>.
17. Extended Lee Model for the Turbine Meter & Calibrations with Surrogate Fluids, Flow Measurement and Instrumentation, 2012; 24: 71 — 82 Jodie G. Pope, John D. Wright, Aaron N. Johnson and Michael R. Moldover.
18. John G. Webster Halit Eren Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, CRC Press Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742, 2014.
19. ДСТУ ГОСТ 8.395:2008 ГСИ. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования (DSTU GOST 8.395:2008 HSY. Normal'nye uslovyu yzmerenyu pry poverke. Obshchye trebovaniya). 

Отримано / received: 23.04.2016.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О.Є. Середюком (Україна).
 Prof. O.E. Seredjuk, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published