

graphite (300-350 mAh / g). This shows the prospect of creating an active anode with a tin graphite oxide structure. The directions of optimization of technological processes of obtaining films, the importance of correct selection of thickness ratios, as well as the possibility of transition to the deposition of tin oxide on the carbon structure are highlighted in the work.

In contrast to conventional technology, we have been producing anode system of electrode lithium-ion battery using vacuum sputtering on copper foil, which method of high-frequency magnetron deposition applied a layer of graphite and tin, meeting a number of technological requirements.

The graphite tin oxide obtained by us has an extremely large variation of values from 380 mAh / g to 690 mAh / g. This is probably due to the raw technology of producing tin graphite by oxidation, as a result of multiphase inclusions of tin oxide. The ambiguity of the graphite structure depending on the film thickness also affects the result.

From the presented results, it follows that intensive search for alternative carbon materials for the anode of lithium-ion battery is underway. Although none of the studied materials can compete with carbon at present, it is hoped that composites and nanocomposites of carbon and non-carbon materials will find application in the production of LIA in the near future.

On the basis of the obtained results the possibility of improvement of technical solutions and introduction of new technological processes in the production of lithium-ion batteries is shown, as well as possible directions of improvement of their operational characteristics are analyzed.

Keywords: graphite; electrode; tin oxide; lithium ion; nanofilm.

Надійшла до редакції
12 листопада 2019 року

Рецензовано
21 листопада 2019 року

УДК 681.121

ВРАХУВАННЯ УМОВ ТА ВІДМІННОСТЕЙ ПРИ КАЛІБРУВАННІ І ЗАСТОСУВАННІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Коробко І. В., Капітанчук Д. Ю.

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна

E-mail: i.korobko@kpi.ua, denykep44@gmail.com

Підвищення точності та надійності реєстрації природного газу є нагальною проблемою сьогодення. Одним із головних факторів впливу на точність вимірювання об'єму та об'ємної витрати газофазних середовищ є невідповідність умов калібрування (повірки) засобів вимірювальної техніки умовам їх застосування. Така невідповідність в першу чергу полягає у відмінності при калібруванні і застосуванні приладу густини, температури, тиску вимірюваного середовища, що призводить до значних величин невизначеності результатів вимірювання. Проблема викликана відсутністю необхідного метрологічного обладнання для проведення напівнатурного калібрування.

Для розв'язання окресленої проблеми пропонується застосувати гідрогазодинамічну теорію подібності і на підґрунті якої визначати комплексний критерій подібності. Такий критерій базується на числах Рейнольдса, Струхала та Ейлера. Після проведення калібрування на повітрі, як правило за атмосферного тиску, визначається комплексний критерій, який слугує основою для розрахунку градуовальної характеристики приладу за реальних умов експлуатації.

Запропонований підхід дозволяє із високою точністю прогнозувати метрологічні характеристики лічильників турбінного класу для різних газових вимірюваних середовищ, базуючись на результатах калібрування на будь-якому з них, проводити оцінювання меж відповідності градуовальних характеристик лічильника турбінного класу за різних параметрів вимірюваного середовища, повірку (калібрування) лічильника турбінного класу здійснювати на повітрі при тиску, близькому до атмосферного, і застосування для обліку природного газу з різними значеннями тиску. Це призводить до підвищення точності реєстрації природного газу без повірки приладів за умов експлуатації і створює можливість діагностування засобів вимірювання на повітряних стендах із використанням в якості вимірюваного середовища повітря.

Ключові слова: природний газ; повітря; калібрування; повірка; метрологічне обладнання; вимірювання.

Вступ. Постановка проблеми

Вимірювальні перетворювачі витрати газу турбінного класу завдяки високій точності, малій інерційності та відносно не складній конструкції набули широкого застосування у нафтогазовій галузі для вирішення цілого спектру задач реєстрації об'єму та об'ємної витрати природного газу [1, 2].

Засоби комерційного обліку природного газу, як правило, проходять перевірку (калібрування) на метрологічних стендах із робочим середовищем – повітря при тиску, близькому до атмосферного, а застосовуються для обліку природного газу із різними значеннями тиску, що зазвичай перевищує величину атмосферного [3]. Відмінність фізичних властивостей повітря і природного газу породжує додаткові похибки вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу.

Постановка задачі

Врахування впливу відмінностей фізичних властивостей робочих середовищ при калібруванні та застосуванні приладів і визначення ступеню впливу на їхні характеристики можливо декількома шляхами: здійсненням калібрування і перевірки за умов експлуатації, або проведення корекції показів за визначеними моделями впливу.

Перший шлях пов'язаний із необхідністю мати метрологічне обладнання із робочим середовищем – природний газ за різних тисків і температур, що є значною проблемою для нашої країни. Тому виникає потреба вибору між доступними альтернативами і плануванням проведення калібрування (періодичної) із пристосуванням до конкретних умов.

Виходячи з цього, перспективним шляхом для розв'язання поставленої задачі є розроблення моделі врахування відмінностей робочих середовищ, на основі якої вносити корекцію в результати вимірювання. Така модель може базуватись на комплексному показнику подібності газових потоків при калібруванні приладів турбінного класу на повітрі і застосуванні їх у реальних умовах експлуатації із плинним робочим середовищем – природним газом. Такий показник базується на підґрунті теорії подібності газодинамічних процесів, що мають місце у проточній частині лічильника газу, враховуючи, при цьому, особливості його конструкції, геометричні розміри та фізичні параметри плинного середовища [1].

Математична модель врахування умов та відмінностей при калібруванні і застосуванні турбінних лічильників газу

Експлуатаційні (в тому числі метрологічні) характеристики лічильників газу турбінного класу залежать від їх конструкції, тиску та витрати вимірюваного середовища, що пов'язано зі змінами його інерційних властивостей, серед яких важливе

значення мають зміни густини та динамічної в'язкості [4, 5].

На сьогодні в Україні випробування та калібрування лічильників турбінного класу за умов їх експлуатації при робочому тиску вимірюваного середовища, вищому за 0,4 МПа, повинні виконуватися за тиску робочого середовища, близького до передбачуваного робочого тиску при його експлуатації [3].

Основні вимоги полягають у наступному [6]:

- калібрування лічильника, виконане на випробувальному стенді у певному діапазоні чисел Рейнольдса, характеризує експлуатаційні параметри приладу, якщо він використовується для вимірювання кількості газу у тому ж діапазоні чисел Рейнольдса. Очікуваний робочий діапазон числа Рейнольдса та/або густини для лічильника необхідно враховувати під час розробки методики калібрування [7];
- вимоги до точності мають бути перевірені за параметрів газового середовища, максимально наближених до умов експлуатації лічильника (тиск, температура, тип газу). Перевірку також може бути виконано із типом газу (наприклад, повітря), відмінним від того, для реєстрації якого призначений лічильник, якщо органи влади, відповідальні за перевірку (верифікацію), переконані, що зіставні результати будуть отримані шляхом оціночних випробувань із різними газами або технічною конструкцією лічильника, що перевіряється [8, 9].

Процедура перевірки (калібрування) турбінних лічильників газу на повітрі за умовами, близькими до стандартних, внаслідок відсутності калібрувальних установок з робочим середовищем – природний газ є поширеною практикою в Україні [10]. В якості безрозмірного критерію гідрогазодинамічної подібності при калібруванні зазвичай використовується число Рейнольдса Re , що є мірою відношення між силами інерції рухомого потоку і тертя та залежить від швидкості потоку вимірюваного середовища v , характерного лінійного розміру D і фізичних властивостей потоку [11]

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

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

Згідно із 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. З цього випливає припущення про однакову кутову швидкість його обертання ω внаслідок однакової відносної кількості кінетичної енергії плинину газу [11].

У загальному випадку число Рейнольдса характеризує відношення сил інерції потоку до гальмівних сил, а отже, обчислене для перерізу вимірювальної камери, залежить від впливу гідрогазодинамічного опору ЧЕ. Таким чином, при визначенні числа Рейнольдса для конкретного турбінного лічильника, в якості характерного лінійного розміру необхідно враховувати аеродинамічний профіль ЧЕ (кількість та кут атаки лопатей, зовнішній та внутрішній радіуси турбінки), параметри спрямляча потоку, тощо.

Виходячи із практичного досвіду авторів статті можна свідчити, що вищезгадані геометричні параметри не надаються жодним із виробників турбінних витратомірів, їх вимірювання найчастіше є неможливим, а тому при реальних дослідженнях обчислення точного значення числа Рейнольдса є складним завданням.

Обов'язковими до врахування є також гальмівні моменти протидії, що викликані не лише параметрами конструкції конкретного лічильника (тертя у підшипникових опорах, момент опору відлікового механізму, тощо), але і газодинамічними властивостями вимірюваного середовища.

Тому для отримання коректних результатів необхідно користуватися умовою рівності витрати та основами теорії подібності, що визначаються:

- 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 і граничних умов;
- рівністю визначальних критеріїв.

Збереження подібності передбачає рівність не тільки відносних однойменних фізичних величин в обох потоках, але й будь-яких безрозмірних комплексів, складених на їх основі. Група пов'язаних поміж собою процесів характеризується однаковими значеннями однойменних чисел подібності (включаючи критерії подібності). А тому добуток чисел подібності або їх частка від ділення будуть у подібних процесах також мати однакові значення і також будуть представляти собою числа подібності. Оскільки два подібних явища відрізняються поміж собою тільки постійними множниками для кожної однойменної величини (константи подібності), можна від рівнянь справедливих для модельного потоку до рівнянь, що відносяться до натурального потоку, множенням кожен величину на відповідну константу подібності [12].

Під час визначення динамічної подібності між різними експериментальними випадками руху рідинно-газо-фазних середовищ доцільно застосувати чотири гідродинамічні критерії подібності: Рейнольдса (1), Фруда, Ейлера та Струхалю.

Число Ейлера – характерне число та критерій подібності, що базується на відношенні між сила-

ми тиску на одиничну площу рідини та питомими силами інерції

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho v^2}, \quad (2)$$

де Δp – перепад тиску; ρ – густина речовини.

Число Струхалю – безрозмірна величина, що характеризує сталість протікання процесів в часі. Одна з формул, що описують число Струхалю [13]

$$Sh = \frac{fL}{v}, \quad (3)$$

де f – частота вихроутворення; L – характерна довжина (наприклад, гідравлічний діаметр).

Число Фруда характеризує співвідношення між силою інерції і зовнішньою силою, у полі якої відбувається рух, що діють на елементарний об'єм рідини або газу [13]

$$Fr = \frac{v^2}{gL}, \quad (4)$$

де g – прискорення, що характеризує дію зовнішньої сили; L – характерна довжина (наприклад, гідравлічний діаметр).

Аналіз запропонованих вище критеріїв подібності (1) – (4) вказує на те, що критерій (число) Фруда для створення комплексного критерію подібності між умовами калібрування засобів вимірювальної техніки і реальними умовами їх застосування можна не враховувати. Це викликано тим, даний критерій більш характеризує дію на елемент потоку конвективних сил інерції і сил тяжіння, тобто зовнішніх сил. А такі сили практично однакові за умов калібрування і застосування приладів.

Головною відмінністю між повітрям та природним газом є в'язкість середовища та його густина. Значення відношення чисел Рейнольдса повітря і природного газу показує, що при атмосферному тиску за однакової швидкості потоку значення числа Рейнольдса повітря на 11,5 % вищі, ніж за 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 (рис.1, рис.2). Число Рейнольдса розраховано для витрати середовища $Q=1000 \text{ м}^3/\text{год}$ та номінального діаметра DN 200.

Отримані результати не відкидають використання гідродинамічного критерію подібності Рейнольдса в цілому, але для вирішення задачі вимірювання об'єму та об'ємної витрати природного газу за високих значень робочого тиску при калібруванні (повірці) турбінного лічильника на повітрі за атмосферного тиску, особливо у діапазоні чисел Рейнольдса, що відповідають ламінарному та пе-

рехідному режимам течії, цього вочевидь не достатньо

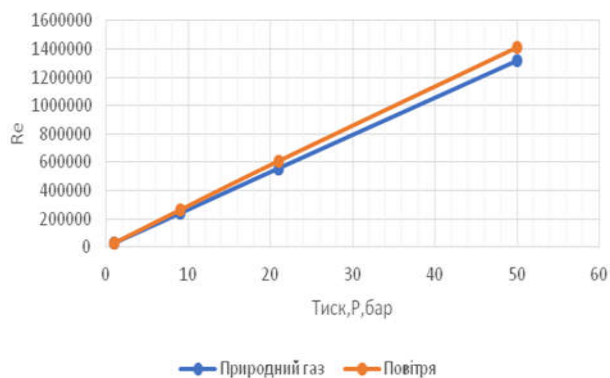


Рис. 1. Залежність чисел Рейнольдса від тиску

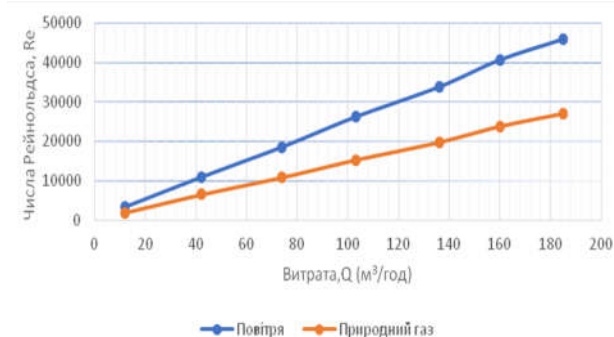


Рис. 2. Залежність чисел Рейнольдса від витрати за різних робочих середовищ

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 турбінки у потоці [14, 15].

Тому актуальною є розробка комплексного критерію газодинамічного процесу, з подальшою можливістю введення його до програми повірки та калібрування. Суть підходу в тому, щоб здійснювати калібрування за робочого середовища – повітря, розрахувати комплексний критерій, і на основі його скоригувати калібрувальну характеристику перетворювача витрати для природного газу.

Висновки

Запропонований підхід дозволяє із високою точністю прогнозувати метрологічні характеристики лічильників турбінного класу для різних газових вимірюваних середовищ, базуючись на результатах калібрування на будь-якому з них, проводити оцінювання меж відповідності градуювальних характеристик лічильника турбінного класу за різних параметрів вимірюваного середовища, повірку (калібрування) лічильника турбінного класу здійснювати на повітрі при тиску, близькому до атмосферного, та застосування для обліку природ-

ного газу з різними значеннями тиску. Це призводить до підвищення точності реєстрації природного газу без повірки приладів за умов експлуатації і створює можливість діагностування засобів вимірювання на повірочних стендах із використанням якості вимірюваного середовища повітря.

Подальші дослідження будуть спрямовані на створення моделі комплексного критерію подібності і перевірка його дієвості за натурних випробувань.

Література

- [1] A. Pisarets, I. Korobko, "Optimization of turbine type flow rate transducer with hydrodynamic balancing of sensitive element", *Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування*. Вип. 54(2), с. 65 – 71, 2017.
DOI: 10.20535/1970.54(2).2017.119574
- [2] І. В. Коробко, Я. М. Власюк, "Розвиток і становлення ефективних систем обліку та контролю якості природного газу", *Нафтогазова галузь України*, №2, с. 36-41, 2019.
- [3] ДСТУ EN 12261:2006. Лічильники газу турбінні. Загальні технічні вимоги. Київ, Україна: Держспоживстандарт України, 2007.
- [4] М. П. Андрієшин, О. М. Карпаш, Я. С. Марчук, І. С. Петришин, О. Є. Середюк, С. А. Чеховський, *Облік природного газу: довідник*. Івано-Франківськ, Україна: ПП «Сімік», 2008.
- [5] Jodie G. Pope, John D. Wright, Aaron N. Johnson and Michael R. Moldover, "Extended Lee Model for the Turbine Meter & Calibrations with Surrogate Fluids", *Flow Measurement and Instrumentation*, 24: pp. 71 – 82, 2012.
- [6] М.П. Андієшин, О.М. Чернішенко, А.В. Едель, "Особливості застосування газодинамічної теорії подібності в процесі калібрування та повірки лічильників природного газу", *Нафтогазова галузь України*, № 6(18), с. 33-36, 2015.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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)

- [10] Ю. В. Кузьменко, В. В. Онушко, А. М. Рак, І. В. Щупак, "Щодо повірки витратомір-лічильників на природному газі", *Український метрологічний журнал*, №4, с. 58-60, 2014.
- [11] П. П. Кремлевский, *Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник. Кн. 1.* - 5-е изд., перераб. и доп. СПб, РФ: Политехника, 2002.
- [12] В. Р. Кулінченко, *Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід: підручник.* Київ, Україна: Фірма «ІНКОС». Центр навчальної літератури, 2006.
- [13] И. Л. Повх, *Техническая гидромеханика.* Ленинград, СССР: Машиностроение, 1976.
- [14] Г. Н. Бобровников, Л. А. Камышев, *Теория и расчет турбинных расходомеров.* Москва, СССР: Изд-во стандартов, 1978.
- [15] Л. Н. Бызов, А. В. Руднев, Л. Г. Сафонова, "Оптимизация параметров турбинного расходомера" в *Расчет и конструирование расходомеров.* с. 75 – 79, 1978.

УДК 681.121

И. В. Коробко, Д. Ю. Капитанчук*Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", Киев, Украина***УЧЕТ УСЛОВИЙ И ОТЛИЧИЙ ПРИ КАЛИБРОВАНИИ И ПРИМЕНЕНИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПРИРОДНОГО ГАЗА**

Повышение точности и надежности регистрации природного газа является насущной проблемой современности. Одним из главных факторов влияния на точность измерения объема и объемного расхода газифазных сред является несоответствие условий калибровки (поверки) средств измерительной техники условиям их применения. Такое несоответствие, в первую очередь, заключается в различии при калибровке и применении прибора таких показателей: плотности, температуры, давления измеряемой среды, что приводит к значительным величинам неопределенности результатов измерения. Проблема вызвана отсутствием необходимого метрологического оборудования для проведения полунатурной калибровки.

Для решения обозначенной проблемы предлагается применить гидрогазодинамическую теорию подобия, и на основе которой определять комплексный критерий подобия. Такой критерий основывается на числах Рейнольдса, Струхала и Эйлера. После проведения калибровки на воздухе, как правило, при атмосферном давлении, определяется комплексный критерий, который служит основой для расчета градуировочных характеристик прибора в реальных условиях эксплуатации.

Предложенный подход позволяет с высокой точностью прогнозировать метрологические характеристики счетчиков турбинного класса для различных газовых измеряемых сред, основываясь на результатах калибровки на любом из них, проводить оценку пределов соответствия градуировочных характеристик счетчика турбинного класса при различных параметрах измеряемой среды, поверку (калибровку) счетчика турбинного класса осуществлять на воздухе при давлении, близком к атмосферному, а применение для учета природного газа с различными значениями давления. Это приводит к повышению точности регистрации природного газа без поверки приборов в условиях эксплуатации и создает возможность диагностирования средств измерения на поверочных стендах с использованием в качестве измеряемой среды воздуха.

Ключевые слова: природный газ; воздух; калибрование; поверка; метрологическое оборудование; измерение.

I. Korobko, D. Kapitanchuk*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine***CONSIDERATION OF CONDITIONS AND DIFFERENCES AT CALIBRATION AND APPLICATION FOR NATURAL GAS FLOW METERS**

Improving the accuracy and reliability of natural gas registration is an actual problem for today. One of the main factors influencing on the measurement accuracy of gas volume and volumetric flow rate is mismatch calibration (verification) conditions of measuring instruments with conditions of their use. This discrepancy is due to differences in the calibration and using devices for measuring medium's density, temperature and pressure that leads to significant uncertainty in the measurement results. The problem is caused by lack of the required metrology equipment for semi-natural calibration.

To solve this problem is proposed to apply a hydrodynamic theory of similarity based on it define a complex criterion of similarity. Such a criterion is based on the numbers of Reynolds, Strouhal and Euler. After calibration with air at atmospheric pressure is determined complex criterion which is the basis for calculating the lapidary characteristics of the device for real operating conditions.

The proposed approach makes it possible to predict the metrological characteristics of turbine type gas meters for different types of gases with high accuracy based on the calibration results of any of them; to evaluate the conformity limits for calibration characteristics of the turbine type gas meter at different parameters of the medium; verification (calibration) of the turbine type gas meter should be with the air at a pressure near to atmospheric and could be used for the

calculation of natural gas at different pressure values. This improves the accuracy of natural gas measurement without verification the instruments during operation and creates the ability to diagnose measuring instruments on test benches using air as the medium.

Keywords: natural gas; air; calibration; verification; metrological equipment; measurement.

*Надійшла до редакції
02 листопада 2019 року*

*Рецензовано
19 листопада 2019 року*