

**НАУКОВІ ТА ПРАКТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ВИРОБНИЦТВА
ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ**

DOI: 10.20535/1970.69(1).2025.331827

УДК 681.5

**АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО АВТОМАТИЗАЦІЇ
ВИТРАТОВИМІРЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК ДЗВОНОВОГО ТИПУ***Гук О. Р., Матіко Ф. Д.**Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна**E-mail: oleh.r.huk@lpnu.ua*

Точне вимірювання витрати та кількості природного газу є одним з визначальних факторів підвищення ефективності технологічних процесів та виробництва. Для метрологічної перевірки та калібрування лічильників газу широко застосовують дзвонові установки, які мають високу точність відтворення одиниці витрати та об'єму газу. Однак процес перевірки лічильника газу на цій установці є трудомістким та потребує автоматизації.

У цій статті виконано аналіз установок різних типів для метрологічної перевірки витратомірів та лічильників газу, виділено їх переваги та недоліки. На основі аналізу наукових джерел та результатів експериментальних досліджень дзвонових еталонних установок встановлено, що ці установки залишаються одним із найточніших засобів калібрування лічильників газу. Проте їх метрологічні характеристики суттєво залежать від умов застосування, зокрема робочого тиску, рівня замкової рідини та температури середовища. Зміна робочого тиску може викликати систематичні похибки до 1,5 %, зміна рівня замкової рідини під впливом температури, випаровування або вібрацій може спричинити похибку до 0,7 %. Ці похибки можуть бути значно зменшені за допомогою автоматизації процесів відтворення одиниці об'єму газу та перевірки лічильника газу. За результатами аналізу дзвонової установки як об'єкта керування пропонується удосконалити системи стабілізації тиску повітря під дзвоном, регулювання рівня замкової рідини для компенсації зміни рівня в динамічних процесах, стабілізації температури повітря під час процедури перевірки лічильників. Додатково авторами планується удосконалити систему керування дзвоною установкою із застосуванням математичних моделей похибок відтворення об'єму та реалізації коригувальних впливів під час процесу перевірки лічильників та витратомірів газу. Удосконалення системи автоматизації дзвонової установки забезпечить підвищення точності установки, зменшення суб'єктивного впливу оператора, можливість інтеграції з системами збору та аналізу даних.

***Ключові слова:** дзвонова установка; похибка відтворення об'єму; система керування; математична модель; параметри газу.*

Вступ. Постановка проблеми

Точний облік витрати природного газу є критично важливим завданням у сфері енергетики, промисловості та комунального господарства. Неточності при вимірюванні об'єму газу можуть призводити до значних економічних втрат, а також ускладнювати взаєморозрахунки між постачальниками та споживачами.

Для перевірки та калібрування лічильників газу використовуються різні методи та установки, які забезпечують необхідну точність відтворення одиниці витрати та об'єму газу. Серед них дзвонові установки, поршневі установки, установки на основі еталонних лічильників та сопел критичного витікання. Кожна з цих установок має свої переваги та обмеження, які потрібно враховувати під час метрологічного забезпечення засобів вимірювання витрати та об'єму газу. Тому доцільним є порівняння переваг та недоліків різних видів установок та формування рекомендацій для вибору установ-

ки для калібрування конкретного витратоміра чи лічильника.

Поряд з цим в Україні і в цілому світі широко застосовують витратовимірювальні установки дзвонового типу. Така установка є Національним еталоном витрати та об'єму газу України. В Національному університеті «Львівська політехніка» дзвонову витратовимірювальну установку також застосовують в навчальному процесі та наукових дослідженнях. Тому підвищення точності та продуктивності дзвонових установок, зокрема і за допомогою їх автоматизації, є актуальним завданням, вирішення якого дає змогу підвищити точність обліку природного газу в цілому в нашій державі.

Аналіз останніх досліджень

Дзвонові еталонні установки забезпечують високоточне відтворення об'ємної витрати та об'єму газу [1]. Проте такі установки мають низку

недоліків, зокрема:

- вплив робочого тиску на точність вимірювань [1];
- вплив зміни рівня замкової рідини на результати калібрування [2];
- обмеження щодо роботи при високих тисках [3];
- неповна автоматизація процесу метрологічної перевірки лічильників, що збільшує час перевірки і трудовитрати [4].

Водночас сучасні дослідження, зокрема європейські розробки таких систем, демонструють ефективність застосування автоматизованих дзюнових установок із цифровими системами контролю та сенсорними технологіями. Роботи [5], [6] акцентують увагу на можливості забезпечення стабільності вимірювання за допомогою точного контролю швидкості руху дзюна, температури та тиску в замкненому об'ємі під дзюном, що суттєво знижує невизначеність відтворюваного об'єму газу. У цих роботах вказано, що дзюнові установки є важливими засобами метрологічного забезпечення витратомірів та лічильників газу.

У роботі [7] представлено аналіз алгоритму роботи дзюнових витратовимірювальних установок, на основі чого здійснено математичне моделювання однієї з компонент похибки відтворення об'єму - похибки від непостійності тиску під дзюном. Розроблено аналітичні вирази для розрахунку цієї складової похибки і виконано порівняння з відомими залежностями для обчислення цієї похибки. Також в роботі визначено умови застосування отриманих залежностей. Отримані в роботі [7] залежності також можуть бути корисними для формування вимог до автоматичного підтримання тиску під дзюном.

Принципи функціонування державного спеціального еталона України для відтворення одиниць об'єму та об'ємної витрати газу, який розроблено на основі дзюнової установки, розглянуто у статті [8]. Тут також виконано оцінювання складових похибки еталона: невилученої систематичної похибки та середньоквадратичного відхилення для відтворюваних одиниць об'єму та об'ємної витрати газу. Результати оцінювання також є корисними для визначення переліку параметрів, який необхідно контролювати в дзюновій установці, та вимог до діапазонів зміни параметрів, які впливають на складові похибки відтворення витрати та об'єму газу.

У роботі [9] розглянуто вдосконалений алгоритм управління дзюновими установками, який дозволяє підвищити точність вимірювання за рахунок цифрової обробки сигналів і оптимізації руху дзюна. Запропонована модернізована конструкція установки забезпечує стабільну витрату навіть за умов флуктуацій тиску та температури, що є актуальним для метрологічних калібрувальних установок. Тобто результати, представлені у [9] вказують на те, що саме автоматизація – циф-

рове опрацювання сигналів та керування рухом дзюна – забезпечує стабільність відтворюваної витрати газу.

У роботі [10] представлено нову систему для калібрування газових витратомірів, розроблену в міському газопостачальному підприємстві Загреб (Хорватія). Система призначена для роботи у діапазоні витрат від 0,02 до 1,4 м³/год і поєднує дзюнову установку з еталонним витратоміром ROMBACH NB2. Авторами впроваджено низку технічних удосконалень, спрямованих на підвищення точності та стабільності вимірювань. За результатами випробувань, невизначеність одиничного вимірювання становила менше ніж 0,09 %, а загальна розширена невизначеність – 0,27 %. Найбільший вплив на результат мали температура та вологість повітря в системі [10]. Запропоноване рішення також забезпечує високу стабільність потоку та виключає перехідні коливання тиску, що робить установку ефективною для точного калібрування та передавання одиниць витрати і об'єму газу.

У статті [11] розглянуто метод калібрування дзюнової установки з використанням критичних сопел Вентурі (CFVN) як переносних еталонів. Такий підхід дозволяє суттєво зменшити витрати часу на калібрування порівняно з традиційними методами, зберігаючи при цьому високу точність. Проведені дослідження показали, що в усьому діапазоні калібрування розширена невизначеність відтворюваного значення витрати не перевищувала 0,2 % при довірчій імовірності 95 %. Окрім цього, метод дає змогу визначати навіть малі об'єми газу, що підвищує гнучкість застосування установок.

В [12] автори розглянули підвищення метрологічної достовірності дзюнової установки, яка використовується як національний еталон витрати газу низького тиску в Індонезії. Автори запропонували замінити традиційний метод вимірювання переміщення дзюна за допомогою роторного енкадера на більш точну схему з використанням ультразвукових сенсорів. Для перевірки результатів було проведено двостороннє міжлабораторне порівняння з Центром метрологічних стандартів ITRI (Тайвань), де як еталонний засіб використовувався турбінний витратомір. У результаті доведено, що оновлена установка забезпечує надійне та узгоджене відтворення об'єму газу в діапазоні 250–1200 л/хв з розширеною невизначеністю 0,80 %. Хоча цей показник дещо вищий за заявлений виробником, він є більш придатним для порівняльних вимірювань між лабораторіями.

У статті [13] описано вдосконалений підхід до оцінки невизначеності дзюнових установок, які використовуються національними метрологічними інститутами (NMI) як еталонні системи відтворення одиниць витрати газу. Автори звертають увагу на зростання вимог до точності після підписання угоди про взаємне визнання (MRA) у 1998 році,

що зумовило потребу у більш деталізованих процедурах оцінювання невизначеності. Для підвищення точності дзвонової установки тут запропоновано змінити положення давачів температури та тиску, а також додано три напрямні з підшипниками для стабілізації тиску в дзвоні. Додатково використано лазерний інтерферометр для покращення вимірювання часу та переміщення дзвона. У результаті вдалося зменшити невизначеність калібрування до 0,13 % при довірчій імовірності 95 %, що є покращенням порівняно з попереднім значенням у 0,17 %. Отримані результати підтверджені в рамках міжнародного міжлабораторного порівняння CCM.FF-K6 під егідою міжнародного комітету мір і ваг (CIPM).

Офіційні джерела провідних метрологічних організацій, таких як NMI (Нідерланди) [14] та NPL (Велика Британія) [15], свідчать про активне впровадження автоматизованих систем калібрування газових лічильників, зокрема і дзвонових установок. Обидві установи надають широкі можливості щодо калібрувальних послуг відповідно до міжнародних стандартів, використовуючи сучасні цифрові технології, віртуальні моделі процесів, високоточні сенсори та програмне забезпечення. Їхній досвід демонструє ефективність впровадження комплексної автоматизації з ціллю підвищення точності, відтворюваності та продуктивності повірки витратомірів.

У роботі [16] розглянуто можливість підвищення точності калібрування ультразвукового витратоміра. У якості еталона витрати застосовано дзвонову установку, для зменшення похибки калібрування застосовано нейронну мережу типу Multi-Layer Perceptron (MLPNN). Через наявність нестабільного потоку та низьких швидкостей у ламінарному режимі в досліджуваному діапазоні (0,2–4 м³/год), в системі спостерігались нелінійні похибки. Автори запропонували використовувати нейромережу для побудови калібрувальної моделі, яка здатна адаптуватися до цих нелінійностей. Результати дослідження показали, що максимальна похибка при використанні MLPNN становила лише 1,21 %, що є кращим за традиційні методи, такі як двоточкове калібрування та метод обмежувальних значень (bracketing). Це підтверджує перспективність використання штучного інтелекту як інструменту високоточної корекції похибок у системах вимірювання витрати.

У статті [17] проведено детальний аналіз динамічної поведінки дзвонової установки з урахуванням взаємодії механічної частини, рідини та газу. Модель базується на системі диференціальних рівнянь, яка описує коливальні процеси при русі дзвона та їхній вплив на точність вимірювань об'єму газу. Розглядаються впливи таких факторів, як інерція мас, в'язкий опір, сили гравітації, тиск газу в дзвоні, а також адгезія замкової рідини. Основна увага приділяється динамічним похиб-

кам, які виникають унаслідок транзиторних (перехідних) коливань після запуску установки. Автори також досліджують можливості їх демпфування (гасіння) з метою підвищення стабільності та точності калібрування. Запропоновано метод комп'ютерного моделювання для прогнозування поведінки установки в реальних умовах.

У роботі [18] описано досвід Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB, Німеччина) щодо експлуатації дзвонової установки як первинного еталона об'єму газу з підтвердженою невизначеністю 0,06 % протягом понад 25 років. В інституті PTB було також впроваджено дві нові первинні установки: одна – модернізована дзвонова установка з аналогічним робочим діапазоном (1–65 м³/год), інша – активно керована поршнева установка, що працює за принципом компаратора і охоплює діапазон 0,04–4 м³/год. В статті детально описано принципи встановлення відліку вимірювань для нових установок, а також результати оцінювання їх невизначеності з використанням звукових сопел як переносних еталонів. Дані було проаналізовано в контексті міжнародного міжлабораторного звіряння еталонних установок CCM.FF-KC6. Було виконано порівняння з результатами дев'яти інших міждержавних порівнянь еталонних установок.

У патенті [19] запропоновано конструктивне вдосконалення дзвонової установки для градування та перевірки витратомірів і лічильників газу. Ключовою особливістю є наявність пристрою стабілізації тиску під дзвоном, який реалізовано через компенсаційне устаткування з вузлом регулювання моменту опору обертання шківів. Цей вузол оснащений гальмівною муфтою та керується за допомогою давача тиску і задавача режиму роботи. Така схема дозволяє забезпечити більш стабільний тиск у піддзвоновому просторі, зменшити динамічні коливання та покращити точність відтворення витрати газу.

У статті [20] представлено розроблену автоматизовану дзвонову установку для калібрування витратомірів, яка поєднує два методи — метод витіснення (exhaust method) та метод всмоктування (air intake method). У класичних конструкціях зазвичай реалізується лише один із цих методів, тому нова система вирізняється гнучкістю та функціональністю. Установку оснащено програмним забезпеченням, яке автоматично керує роботою клапанів і напрямком потоку через відповідні трубопроводи, що дозволяє виконувати повний цикл калібрування без ручного втручання. Це не лише економить час, а й знижує ймовірність помилки. Система характеризується компактністю, простотою впровадження та можливістю модернізації на базі вже існуючих установок, що робить її ефективною як з технічної, так і з економічної точки зору.

Отже з аналізу літературних джерел видно, що дзвонові установки є широко застосовуваними ета-

лонними установками для перевірки та калібрування витратомірів і лічильників газу за низького тиску. Однак процес перевірки приладів за допомогою дзвонової установки є трудомістким і досить тривалим. Ручне керування дзвоною установкою під час відтворення одиниці об'єму (витрати) призводить до виникнення низки похибок, зокрема динамічних похибок внаслідок зміни тиску та температури повітря під дзвоном, похибки внаслідок зміни рівня замкової рідини. Деякі з цих похибок виникають внаслідок нерівномірності руху дзвона під час процедури перевірки (калібрування) приладів, яка також призводить до зміни відтворюваної витрати. Тому незаперечним є те, що для підвищення точності дзвонової установки, зменшення трудомісткості та тривалості процесу калібрування потрібно виконати її автоматизацію. Автоматизація також дає можливість зменшити кількість помилок при керуванні процесом перевірки (калібрування) приладів та підвищити стабільність відтворюваного значення витрати. Під час автоматизації дзвонової установки також потрібно врахувати сучасні можливості підвищення її точності за допомогою впровадження алгоритмів адаптивного керування та засобів штучного інтелекту здатних компенсувати вплив зовнішніх факторів.

Метою цієї роботи є виконання аналізу існуючих методів та установок для метрологічної перевірки лічильників та витратомірів газу, аналіз дзвонової витратовимірювальної установки як об'єкта керування та аналіз сучасних підходів до автоматизації витратовимірювальних установок дзвоного типу. Результати проведеного аналізу дають можливість розробити рекомендації для автоматизації дзвонових установок.

Основна частина

Дзвоніві еталонні установки широко застосовують для перевірки газових лічильників, оскільки вони забезпечують високу точність відтворення об'єму газу. Принцип їхньої роботи полягає у витісненні газу мірним дзвоном, що опускається під власною вагою, забезпечуючи стабільний потік [1]. Подібні установки є основою національних і міжнародних калібрувальних лабораторій, зокрема в Нідерландах [14], Німеччині [18], а також використовуються компаніями в багатьох європейських країнах, наприклад у Хорватії [10].

Дзвонова установка складається з таких основних елементів:

1) газовий дзвін - основний резервуар, який занурюється в рідину; дзвін повинен мати жорстку і гладку поверхню для рівномірного підйому і опускання [19], розміри дзвона залежать від діапазону витрати, який потрібно відтворювати;

2) ємність з рідиною, у яку занурюється дзвін; ємність наповнена водою або оливою (для захисту від випаровування або змін у вологості) та

забезпечує герметичність об'єму під дзвоном; рідина також забезпечує постійний гідростатичний тиск, що зменшує втрати газу при його витісненні;

3) система вимірювання положення дзвона; рух дзвона (підйом чи опускання) контролюється спеціальними давачами положення, що дозволяють визначити об'єм газу; сучасні установки часто використовують давачі з цифровим вихідним сигналом, які надають точні дані про положення дзвона в реальному часі;

4) вимірювальні прилади: установка має бути оснащена давачами для вимірювання температури, тиску та вологості, оскільки ці параметри впливають на об'єм газу і, відповідно, на точність відтворення витрати та об'єму газу; у деяких установках використовують компенсатори температури і тиску для забезпечення високої точності вимірювань [20].

Принципова схема дзвонової установки з вільним переміщенням дзвону представлена на рисунку 1 [19].

Цикл відтворення одиниці витрати (об'єму) газу та перевірки витратоміра (лічильника) газу 22 виконують таким чином. Перед початком випробувань за допомогою задавача 14 встановлюють необхідний режим роботи вузла регулювання моменту опору 13, який керує гальмівною муфтою 12. Це дозволяє сформувати необхідний гальмівний момент обертання шківів 11 компенсаційного устаткування, відповідно до умов дослідження приладів та заданого значення витрати газу. Наступним кроком є встановлення необхідного положення дроселюючого елемента у вузлі 23, який визначає витрату газу через випробувальну ділянку. Після цього виконують наповнення дзвону робочим газом у такій послідовності:

- через вхідний трубопровід 17 за допомогою повітродувки 16 при відкритому клапані 18 і закритому клапані 20 у піддзвоновий простір подають робочий газ; це триває доти, доки дзвін 1 досягне верхнього положення;
- досягнувши необхідного положення, клапан 18 закривають, подачу газу припиняють, і дзвін перебуває у нерухомому, зваженому стані.

Після цього виконують відтворення заданої витрати газу та перевірку витратоміра (лічильника) 22. Для цього відкривають запірний клапан 20 та подають робочий газ у випробувальну ділянку 21. Під дією власної ваги дзвін 1 починає повільно опускатися, витісняючи газ через випробувальну ділянку 21 і досліджуваний прилад 22. Формування витрати у вихідному трубопроводі 19 відбувається за рахунок попередньо встановленого положення дроселюючого пристрою 23. Одночасно, об'єм газу, що пройшов, вимірюється мікропроцесорним вимірювачем контрольного об'єму 7 на основі переміщення контрольної лінійки 5 вздовж оптичелектронної пари 6..

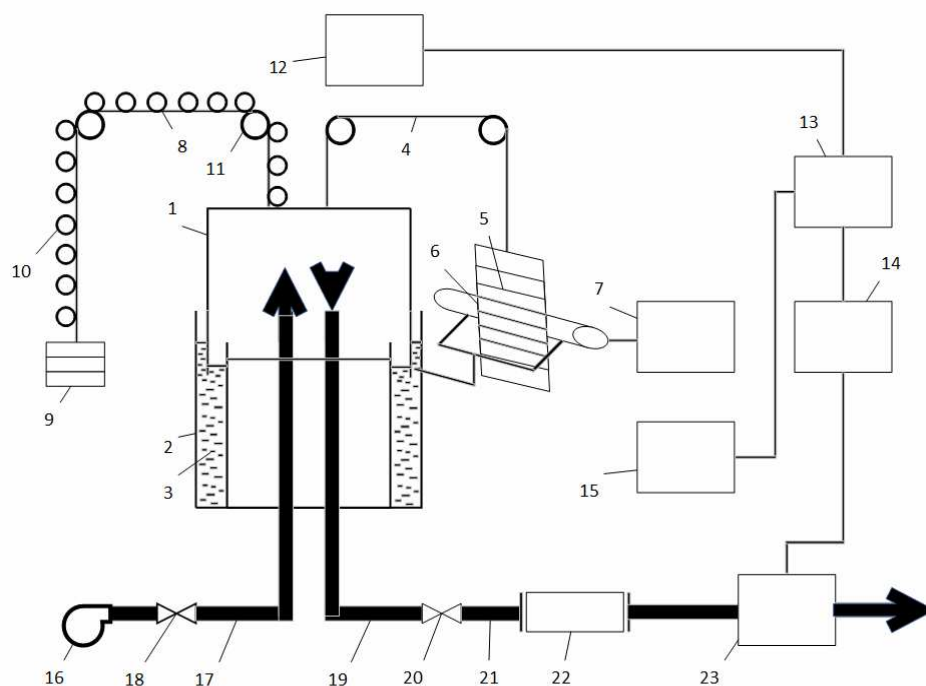


Рис. 1. Принципова схема дзвонової установки [19]: 1 – дзвін; 2 – резервуар заповнений рідиною; 3 – рідина; 4 – сталевий стрічок для кріплення контрольної лінійки; 5 – контрольна лінійка; 6 – оптикоелектронна пара; 7 – мікропроцесорний вимірювач об'єму газу; 8 – сталевий стрічок кріплення дзвона; 9 – протипада; 10 – локальні важки для стабілізації тиску; 11 – шків; 12 – гальмівна муфта; 13 – вузол регулювання моменту; 14 – задавач режиму роботи вузла 13; 15 – давач тиску під дзвоном; 16 – повітродувка; 17 – вхідний трубопровід; 19 – вихідний трубопровід; 18, 20 – запірні клапани; 21 – випробувальна ділянка; 22 – досліджуваний витратомір (лічильник); 23 – вузол задання витрати

У процесі опускання вага дзвону зменшується через зростання виштовхувальної сили, яка залежить від глибини занурення. Відповідно до алгоритму вузла 13, гальмівний момент регулюється через шків 11 і муфту 12 для компенсації зміни ваги дзвона [19]. Зміна ваги дзвона виникає внаслідок локальних відхилень форми дзвона (відхилення від циліндричності), внаслідок зміни гідравлічного опору його переміщенню.

Для вимірювання тиску в піддзвоновому просторі застосовують давач тиску 15. Вихідний сигнал давача тиску подають на вхід вузла регулювання моменту 13. При зниженні тиску гальмівний момент зменшується, при зростанні – збільшується. Таким чином, забезпечують постійну витрату газу під час усього циклу опускання дзвона, що дозволяє точно відтворити та виміряти об'єм або витрату газу. Після завершення випробування запірний клапан 20 закривають, що сигналізує про завершення циклу.

Для метрологічної перевірки чи калібрування лічильників газу визначають контрольний об'єм, виміряний мікропроцесорним вимірювачем 7 та порівнюють його з об'ємом, який одночасно зафіксував досліджуваний лічильник 22. На підставі розбіжностей оцінюють метрологічні характеристики лічильника. Під час перевірки витратоміра фіксують контрольний об'єм і обчислюють від-

творювану витрату за час переміщення дзвону та порівнюють її з вихідним сигналом витратоміра, на підставі чого визначають його метрологічні характеристики [19].

Як видно з проведеного огляду літературних джерел, а також поданого вище опису конструкції дзвонової установки з вільним переміщенням дзвона [19], основними перевагами дзвонових установок є:

- висока точність вимірювань;
- можливість перевірки приладів різних типів та конструкцій;
- стабільність відтворюваної витрати газу; широкий діапазон відтворюваних витрати та об'єму газу.

До недоліків дзвонових установок відносять:

- вплив робочого тиску на точність відтворення витрати (об'єму) та калібрування приладів [1];
- вплив зміни рівня замкової рідини на результати калібрування [2];
- обмеження щодо роботи при високих тисках [3];
- відносно великі габаритні розміри установки та висока вартість, спеціальні вимоги до приміщення лабораторії.

Для підвищення точності роботи дзвонових установок пропонуються різні методи корекції похибок, зокрема, введення цифрових систем контролю та автоматизація із врахуванням математи-

чних моделей процесів, що відбуваються під час роботи установки [3, 5 - 10].

Поршневі витратовимірювальні установки є альтернативою дзвоновим і реалізують принципи витіснення об'єму газу під час контрольованого руху поршня у каліброваному трубопроводі. Витіснений об'єм газу протікає через прилад, який перевіряють [6].

Виділяють такі переваги поршневих установок:

- висока точність відтворення витрати та об'єму газу;
- можливість роботи при високих тисках;
- застосування у якості робочого газу повітря або природного газу.

Поряд з вказаними перевагами поршневих установок мають такі недоліки [6]:

- висока складність конструкції та обслуговування;
- вплив механічного зносу поршня на точність вимірювань, можливість виникнення пульсацій внаслідок впливу приводу поршня;
- чутливість до коливань температури та тиску, що може викликати додаткові похибки;
- великі габаритні розміри установки та висока вартість, спеціальні вимоги до приміщення лабораторії.

Зважаючи на вказані недоліки, поршневі установки менш поширені у практиці метрологічного забезпечення засобів вимірювання витрати та об'єму газу.

Для перевірки та калібрування витратомірів та лічильників газу широко застосовують також установки на основі еталонних лічильників та масових витратомірів. Еталонні лічильники застосовують для компараторних методів перевірки, коли результати вимірювань досліджуваного приладу порівнюють з результатами вимірювань еталонного лічильника [1, 6].

Переваги установок на основі еталонних лічильників та витратомірів:

- можливість роботи при високому тиску та від-

творення витрати газу у широкому діапазоні;

- можливість тривалого відтворення фіксованого значення витрати газу;
- порівняно невисока вартість установок.

Поряд з вказаними перевагами ці установки мають такі недоліки [6]:

- нижча точність порівняно з дзвоновими та поршневими установками;
- залежність точності від стану робочого середовища (температури, тиску, вологості);
- потреба в періодичному калібруванні еталонних лічильників та витратомірів на високоточних установках.

Відомі також витратовимірювальні установки на основі сопел критичного витікання [6]. У цих установках у якості задавачів витрати застосовують сопла (сопла Вентурі), які працюють в умовах критичного (надкритичного) перепаду тиску. В таких умовах швидкість у горловині сопла стає рівною швидкості звуку і сопло з високою точністю відтворює задану витрату газу.

Установки на основі сопел критичного витікання забезпечують:

- можливість роботи при високому тиску та відтворення витрати газу у широкому діапазоні;
- можливість тривалого відтворення фіксованого значення витрати газу;
- порівняно невисоку вартість установок.

Поряд з вказаними перевагами ці установки мають такі недоліки [6]:

- нижча точність порівняно з дзвоновими та поршневими установками;
- необхідність застосування для відтворення фіксованого значення витрати окремого сопла (набору сопел);
- вимірювання витрати та об'єму газу непрямим способом та їх залежність від точного задання тиску газу перед соплами.

Результати порівняння витратовимірювальних установок різних видів зібрано у таблиці 1.

Таблиця 1. Результати порівняльного аналізу витратовимірювальних установок

Вид установки	Точність	Робота високому тиску	Стабільність витрати газу	Вартість
Дзвонові установки	Висока	Ні	Висока	Висока
Поршневі установки	Висока	Так	Середня (вплив пульсацій)	Висока
Еталонні лічильники	Середня	Так	Середня	Середня
Сопла критичного витікання	Середня	Так	Середня	Середня

З представленого аналізу витратовимірювальних установок видно, що дзвонові установки є високоточними засобами відтворення витрати та об'єму газу за тиску, що близький до атмосферного. Ці установки забезпечують високу стабільність відтворюваного значення витрати. Однак для досягнення високої точності та продуктивності необхідно виконувати автоматизацію дзвонових установок.

Основними факторами, які призводять до виникнення додаткових похибок вимірювання витрати та об'єму газу в дзвонових установках є флуктуації тиску газу під дзвоном, зміна рівня замкової рідини та вплив температури. Для аналізу та мінімізації цих похибок розроблено математичні моделі, які дають можливість прогнозувати та компенсувати ці похибки під час роботи дзвонової

установки [2, 3, 7-10].

Вплив зміни тиску під дзвоном на похибку відтворення витрати та об'єму газу.

Одним із ключових факторів, що впливають на точність вимірювань у дзюнових установках, є нестабільність тиску газу в піддзюновому просторі. Дослідження показали, що при опусканні мірного дзвону можуть виникати коливання тиску, які впливають на точність відтворення об'єму газу [7]. Для стабілізації тиску потрібно застосовувати системи регулювання ваги дзвона, що забезпечують рівномірне занурення та зменшують гідродинамічний опір [3, 7].

Доповнюючи традиційні підходи, у нових дослідженнях, зокрема у роботі [6], зазначено, що використання активних систем керування тиском із високочутливими сенсорами та PID-регулюванням дозволяє стабілізувати тиск у реальному часі. Це зменшує вплив флуктуацій тиску в піддзюновому об'ємі та покращує відтворюваність результатів.

Дослідження, проведені в [1], показали, що при зміні робочого тиску у дзюнових установках можуть виникати систематичні похибки до 1,5 %. Основні причини таких відхилень:

- деформація дзвона під дією підвищеного тиску;
- вплив перепаду тиску між внутрішнім і зовнішнім середовищем;
- взаємодія газу з замковою рідиною, що змінює рівень її поверхні.

За результатами досліджень автор [1] пропонує застосовувати автоматизоване регулювання тиску газу під дзвоном та вводити в алгоритми керування цифрові моделі коректування переміщення дзвона, що дає можливість зменшити похибку установки до 0,3 %.

За результатами досліджень, що представлені в [5], серед джерел невизначеності одне з найважливіших – це перепади тиску під час заповнення дзвона, що при нестабільному потоці або нестабільному тиску дає внесок у загальну невизначеність до 0,04 %.

У роботі [3] розглянуто методику оцінювання похибок у дзюнових установках, що працюють при відносно високому надлишковому тиску. Автори запропонували нову конструкцію витіснювача у формі паралелепіпеда, яка знижує деформаційні ефекти під дією високого тиску. Як висновок, автори пропонують помістити дзюновий витіснювач у барокамеру, яка дозволяє зменшити вплив перепаду тиску. Автори вказують, що така конструкція установки та застосування автоматизованої системи корекції стабілізує результати вимірювань навіть при тиску до 10 бар.

Вплив зміни рівня замкової рідини.

Рідина, що використовується в дзюнових установках для герметизації (замкова рідина), може змінювати свій рівень під дією зовнішніх факторів, зокрема, зміни температури, випаровування рідини, нерівномірного занурення дзвона.

Зміна рівня рідини безпосередньо впливає на об'єм витісненого газу, що може призводити до похибки вимірювання об'єму газу до 0,7 % [2]. Для вирішення цієї проблеми у [2] розроблено модель корекції похибки, що враховує зміну рівня рідини в процесі роботи установки. Основна ідея полягає у динамічному балансуванні рівня замкової рідини та використанні компенсаційних механізмів для підтримки стабільного рівня.

Згідно з [10], у сучасних автоматизованих дзюнових установках застосовують давачі контролю рівня рідини, які працюють у зворотному зв'язку з системою переміщення дзвона, зменшуючи вплив оператора і забезпечуючи стабільність умов вимірювання.

В роботах [5, 14] вказано, що рівень замкової рідини відіграє ключову роль у стабільності об'єму газу, особливо у випадку експлуатації установки за надлишкового тиску газу або нестабільної температури навколишнього середовища.

Вплив температури газу.

Окрім тиску та рівня рідини, на точність вимірювань у дзюнових установках впливає температура робочого середовища. При підвищенні температури газ розширюється, що може створювати додаткові похибки вимірювання об'єму. При зниженні температури густина рідини змінюється, що впливає на рівень занурення дзвона.

Контроль температури є обов'язковою умовою для мінімізації похибок у сучасних дзюнових установках [1]. У роботі [6] вказано, що навіть мінімальні температурні градієнти в повітряному просторі довкола дзвона можуть впливати на стабільність відтворення об'єму, тому рекомендується використовувати багатоточкове температурне зондування з компенсаційними алгоритмами.

Підсумовуючи аналіз впливу основних факторів на похибку дзюнової установки, потрібно відзначити що:

- флуктуації тиску газу під дзвоном можуть призводити до виникнення додаткової похибки, тому необхідно застосовувати системи керування переміщенням дзвона;
- зміна рівня замкової рідини є критичним фактором, що коригується динамічним балансуванням із застосуванням математичних моделей;
- температурний вплив може бути усунутий за допомогою стабілізації температури в лабораторії, або врахований через коефіцієнти термічного розширення дзвона.

Таким чином, сучасні дзюнові установки повинні бути оснащені автоматизованими системами керування, які враховують математичні моделі додаткових похибок, що є перспективним напрямком їх модернізації.

Автоматизація процесу метрологічної перевірки лічильників газу базується на впровадженні:

- давачів тиску, температури та рівня рідини, переміщення дзвона, що дозволяють моніторити стан установки в реальному часі;
- систем стабілізації тиску газу під дзвоном, які

- системи автоматизованого регулювання рівня замкової рідини, що компенсує зміни рівня під час роботи установки.

У роботі [13] виконано оцінювання загальної розширеної невизначеності автоматизованої дзвонної установки, яка рівна 0,06 %, при цьому впровадження систем автоматизації дало можливість зменшити додаткові складові невизначеності від зміни тиску, температури газу та рівня замкової рідини, відповідно найбільші складові невизначеності дали визначення часу відтворення об'єму газу (0,040 %) і густини повітря (0,030 %).

Таким чином, результати експериментальних досліджень підтверджують, що впровадження автоматизованих алгоритмів і цифрових систем керування є ключовим напрямком удосконалення дзвонних витратомірювальних установок.

Провідні світові метрологічні організації підтвердили ефективність автоматизації дзвонних установок. Національний метрологічний інститут у Нідерландах (NMI) впровадив повністю автоматизовані дзвонні установки з цифровими системами позиціонування дзвона та компенсації похибок. За даними [14], впровадження високочастотних сенсорів забезпечило стабільну точність калібрування при мінімальних витратах ручної праці.

Національна фізична лабораторія Великої Британії (NPL) використовує систему на базі LabVIEW з віртуальними моделями дзвона, дослідженими за допомогою COMSOL Multiphysics, та багатоканальними сенсорами тиску і температури (± 0.001 бар, $\pm 0.01^\circ\text{C}$) [15]. Автоматична система калібрування дозволяє досягати невизначеності ± 0.15 % для побутових лічильників та забезпечує повну простежуваність результатів вимірювання.

Висновки

На основі аналізу наукових джерел, огляду технічних характеристик дзвонних еталонних установок та відомих результатів експериментальних досліджень зроблено такі висновки:

- дзвонні установки є одними з найточніших засобів перевірки та калібрування лічильників газу; проте їх метрологічні характеристики суттєво залежать від зовнішніх факторів, зокрема робочого тиску, рівня замкової рідини та температури середовища;
- вплив змін робочого тиску в неавтоматизованій установці може викликати систематичні похибки до 1,5 %, зміна рівня замкової рідини під впливом температури, випаровування або вібрацій може спричинити похибку до 0,7 %, що є неприйнятним для установки, яку застосовують у якості еталону;
- автоматизація процесу відтворення об'єму газу та калібрування лічильників (витратомірів) відіграє ключову роль у зменшенні похибок і підвищенні ефективності дзвонної установки; впровадження адаптивних цифрових алгорит-

мів керування дає можливість значно зменшити похибку установки, а також зменшити тривалість калібрування приладів.

За результатами аналізу наявної в Національному університеті «Львівська політехніка» дзвонної установки як об'єкта керування, пропонується удосконалити системи стабілізації тиску повітря під дзвоном, регулювання рівня замкової рідини для компенсації зміни рівня в динамічних процесах, стабілізації температури повітря під час процедури перевірки лічильників. Додатково авторами планується удосконалити систему керування дзвонною установкою із застосуванням математичних моделей похибок відтворення об'єму та реалізації коригувальних впливів під час процесу перевірки лічильників та витратомірів газу.

Удосконалення системи автоматизації дзвонної установки забезпечить підвищення точності установки, зменшення суб'єктивного впливу оператора, надасть можливість інтеграції з системами збору та аналізу даних.

Література

- [1] І. С. Бродин, “Точний облік витрати природного газу – запорука зменшення його втрат”, *Методи та прилади контролю якості*, № 7, с. 116–118, 2001.
- [2] С. І. Мельничук, “Дослідження впливу зміни рівня замкової рідини в установках дзвонного типу на точність відтворення об'єму газу”, *Методи та прилади контролю якості*, № 9, с. 45–49, 2002.
- [3] І. С. Петришин, Т. І. Присяжнюк, О. А. Бас, “Оцінка невизначеності калібрувальної установки дзвонного типу для роботи при високому надлишковому тиску”, *Системи обробки інформації*, Вип. 2, с. 39–42, 2015. [Електронний ресурс]. Доступно: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2015_2_12
- [4] F. Matiko, O. Pistun, “Methodology for developing an automated adaptive system for measuring fluid volume based on gas meter”, *Energy Engineering and Control Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 153–160, 2024. DOI: 10.23939/jeecs2024.02.153
- [5] B. Pavlović, “Advances in gas flow measurement using weighing method”, *Strojarstvo*, vol. 50, no. 5, pp. 295–304, 2008.
- [6] J. Prakosa, C. Su, W. Wang, B. Sirenden, G. Zaid, N. T. Darmayanti, “The Traceability Improvement and Comparison of Bell Prover as the Indonesian National Standard of Gas Volume Flow Rate”, *MAPAN*, vol. 36, 2020. DOI: 10.1007/s12647-020-00402-4
- [7] О. Є. Середюк, “Математичне моделювання похибки від непостійності тиску в дзвонних витратомірювальних установках”, *Методи та прилади контролю якості*, № 2, с. 23–27, 1998.
- [8] А. Г. Бестелесний, І. С. Петришин, “Алгоритм оцінки похибок державного спеціального еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газу”,

- Методи та прилади контролю якості, № 1, с. 75–79, 1997.
- [9] I. S. Brodin, O. E. Seredyuk, “Improved functional algorithm and design for Bell-type flowmeters”, *Measurement Techniques*, vol. 32, pp. 437–440, 1989. DOI: 10.1007/BF00866220
- [10] B. Pavlović, H. Kozmar, M. Šunić, “A new system for the calibration of gas flow meters”, *Transactions of FAMENA*, vol. 33, no. 1, pp. 37–46, 2009.
- [11] J. Wildner, M. Turkowski, M. Szudarek, A. Zadworny, “Calibration of Bell Prover Test Stands with Critical Flow Venturi Nozzle”, in *Mechatronics 2019: Recent Advances Towards Industry 4.0*. Springer, 2020. pp. 172–177. DOI: 10.1007/978-3-030-29993-4_22
- [12] V. Wegelin, “Calibration and Maintenance”, in *Instrument and Automation Engineers' Handbook: Process Measurement and Analysis*, B. G. Lipták and K. Venczel, Eds. 5th ed., vol. 1, Boca Raton (FL): CRC Press, 2017, pp. 246–259.
- [13] H. M. Choi, K. A. Park, Y. K. Oh, Y. M. Choi, “Uncertainty evaluation procedure and intercomparison of bell provers as a calibration system for gas flow meters”, *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 21, no. 4, pp. 488–496, 2010. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2010.07.002
- [14] National Metrological Institute of Netherlands. [Online]. Available: <https://nmi.nl>
- [15] National Physical Laboratory (NPL), United Kingdom. [Online]. Available: <https://www.npl.co.uk/calibration>
- [16] B. Yazdanshenasshad, M. S. Safizadeh “Neural-network-based error reduction in calibrating utility ultrasonic flow meters”, *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 64, pp. 54–63, 2018.
- [17] F. W. Ruegg, F. C. Ruegg “Dynamics of the Bell Prover, II”, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 95, no. 1, pp. 15–31, 1990.
- [18] B. Mickan, R. Kramer, “Evaluation of two new volumetric primary standards for gas volume established by PTB”, in *Proc. of the 7th International Symposium on Fluid Flow Measurement (ISFFM)*, Anchorage, Alaska 2009.
- [19] Д. О. Середюк, “Дзвонова установка для градування та перевірки витратомірів і лічильників газу”, пат. на корисну модель №27563, Україна, 2007.
- [20] YongWan, PengTian, “Design and Implementation of Automatic Switching Exhaust Method and Air Intake Method Bell Prover Gas Calibration Facility”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2459, 2023. Article 012110. DOI: 10.1088/1742-6596/2459/1/012110

UDC 681.5

O. R. Huk, F. D. Matiko*Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine***ANALYSIS OF MODERN APPROACHES TO AUTOMATION OF BELL-TYPE PROVERS**

Accurate measurement of flow rate and quantity of natural gas is one of the key factors for increasing the efficiency of technological processes and production. Bell provers are widely used for metrological verification and calibration of gas meters, which have high accuracy of reproducing the unit of gas flow rate and volume. However, the process of verifying a gas meter using this installation is laborious and requires automation.

The installations of various types for metrological verification of flow meters and gas meters are analyzed in the article, highlighting their advantages and disadvantages. Based on the analysis of scientific sources and the results of experimental studies of bell provers, it was established that these installations remain one of the most accurate means for calibrating gas meters. However, their metrological characteristics significantly depend on the conditions of use, in particular the operating pressure, the level of the lock liquid the environment temperature. A change in the operating pressure can cause systematic errors of up to 1.5%, a change in the level of the lock liquid under the influence of temperature, evaporation or vibrations can cause an error of up to 0.7%. These errors can be significantly reduced by automating the processes of reproducing a unit of gas volume and checking a gas meter. Based on the results of the analysis of the bell installation as a control object, the authors proposed to improve the systems for stabilizing the air pressure under the bell, regulating the level of the lock liquid to compensate for changes in the level in dynamic processes, and stabilizing the air temperature during the meter checking. Additionally, the authors plan to improve the bell installation control system using mathematical models of volume reproduction errors and implementing corrective actions during the process of checking gas meters and flow meters. Improving the bell prover automation system will ensure increased installation accuracy, reduced subjective operator influence and the possibility of integration with data collection and analysis systems.

Keywords: bell prover; volume reproduction error; control system; mathematical model; gas parameters.

Надійшла до редакції
16 квітня 2025 року

Рецензовано
19 травня 2025 року



© 2024 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).