

УДК 681.122

І.С. Петришин, Т.І. Присяжнюк, О.А. Бас

ДП «Івано-Франківськстандартметрологія», Івано-Франківськ

## ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ КАЛІБРУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ДЗВОНОВОГО ТИПУ ДЛЯ РОБОТИ ПРИ ВИСОКОМУ НАДЛИШКОВОМУ ТИСКУ

*Стаття присвячена розробленню удосконаленої конструкції установки дзвонового типу для можливості роботи при високому надлишковому тиску. Запропонована конструкція витіснювача у формі паралелепіпеда, який виготовлений зі скла. Для роботи установки при високих надлишкових тисках дзвоний витіснювач поміщено у барокамеру. Оцінено апріорну невизначеність передавання одиниць об'єму та об'ємної витрати газу при високому тиску дзвоною установкою.*

**Ключові слова:** невизначеність, дзвонова установка, об'єм газу, об'ємна витрата газу, високий тиск, калібрування.

### Вступ

Зважаючи на невпинний ріст вартості природного газу, питання підвищення точності та достовірності його обліку при взаєморозрахунках між постачальником та споживачем набуває винятково важливого значення. Законодавчо регламентовані вимоги щодо границь допустимої відносної похибки промислових лічильників газу в межах  $\pm 1\%$  та  $\pm 2\%$ , отриманих при повірці на повітрі при атмосферному тиску, уже не забезпечують вимоги споживачів, які використовують великі об'єми природного газу та зацікавлені у якомога точнішому обліку. Тому одним із найважливіших аспектів з метою підвищення точності обліку природного газу є створення можливості контролю метрологічних характеристик лічильників газу на робочому середовищі – природному газі з відповідними робочими тисками. Третьою стороною між постачальником та споживачем є виробники лічильників газу, які також зацікавлені одержати характеристики лічильників, отримані при калібруванні за умов газового середовища. Тому постала актуальна задача та необхідність створення еталонних установок одиниць об'єму та об'ємної витрати газу з використання природного

газу, як робочого середовища для проведення калібрування лічильників газу при високому надлишковому тиску.

**Аналіз останніх досліджень** і публікацій проведений в [1] показує, що є різні типи установок, з можливістю роботи при високому надлишковому тиску. Кожна з них має свої переваги і недоліки. Стосовно установки дзвонового типу, то поряд з незаперечними перевагами, основним недоліком є неможливість роботи при високому тиску.

**Метою** даної статті є розроблення удосконаленої конструкції установки дзвонового типу з можливістю проведення калібрування лічильників газу при високому надлишковому тиску.

### Розроблення удосконаленої конструкції

Прототипом дзвонової установки для роботи при високому тиску є класична конструкція дзвоного дифманометра [2]. Принцип дії дифманометра полягає у вимірюванні різниці тисків, які діють під дзвоним простором та над ним. Чутливим елементом такої конструкції є дзвоний витіснювач, підвішений на гвинтовій пружині, переміщення якого під дією різниці тисків вимірюється за допомогою

вторинних перетворювачів. Разом з тим, в [3] запропонований об'ємно – динамічний метод вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу з використанням дзвонової установки в якості лічильника об'єму газу. При цьому витіснення облікованого газу з під дзвона здійснюється внаслідок нагнітання газу в простір над ним. Також слід звернути увагу на широке застосування в метрологічній практиці газового скляного мірника – клепсидри, яка використовується для атестації та повірки установок дзвонового типу. Зокрема, використання такого мірника передбачено методикою атестації установок дзвонового типу [4]. Таким чином, з врахуванням усіх переваг типової схеми установки дзвонового типу та проаналізованих варіантів реалізації, авторами запропонована удосконалена конструкція дзвонової установки з витіснювачем у формі паралелепіпеда, який виготовлений зі скла, з можливістю роботи при високому надлишковому тиску.

На рис. 1 представлена схема удосконаленої дзвонової установки.

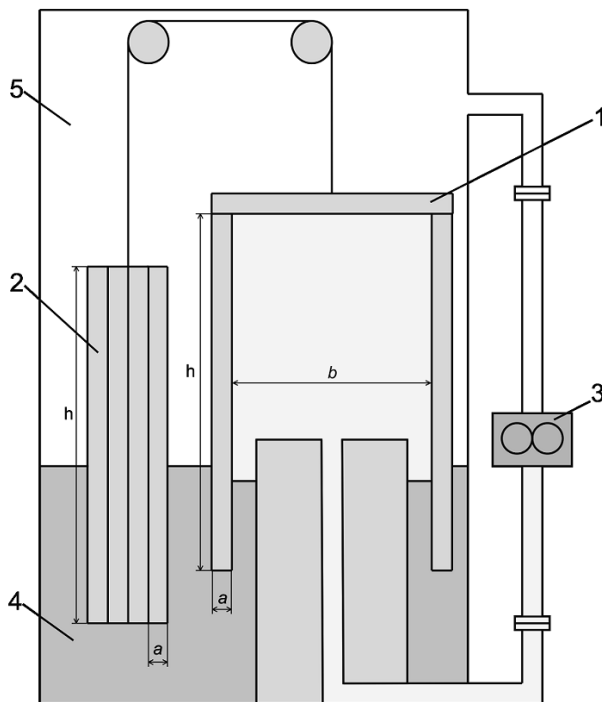


Рис. 1. Схема удосконаленої установки дзвонового типу для роботи при високому тиску  
1 – дзвоновий витіснювач; 2 – протитяга (компенсатор); 3 – лічильник газу; 4 – гідрозамок;  
5 – барокамера, в яку переміщується газ після лічильника; а – товщина стінки дзвона;  
b – ширина стінки; h – висота стінки.

Установка в такому вигляді може працювати при значних надлишкових тисках, верхня межа яких обмежена міцністю складових елементів. Така особливість установки пов'язана з тим, що конструктивно на стінку дзвонової витіснювача та рідину гідрозамка діє тільки перепад тиску, який кількісно

виражений в одиницях кПа, які спричинені втратами тиску в лічильнику газу під час калібрування, оскільки надлишковий тиск навколо витіснювача умовно рівний тиску всередині нього. Це відповідає тому, що в системі діє гідравлічний опір у вигляді лічильника газу, який спричиняє найбільші втрати тиску, оскільки втрати тиску на згинах трубопроводів та втрати по довжині становлять значно меншу величину. В загальному випадку в барокамері та в дзвоновому витіснювачі забезпечується таке значення надлишкового тиску, при якому проводиться калібрування лічильника газу.

Основна відмінність удосконаленої дзвонової установки від типової полягає у формі витіснювача 1, який являє собою паралелепіпед, матеріалом якого є скло. При цьому, незаперечною перевагою є те, що для виготовлення витіснювача не потрібно застосовувати громіздкі та складні конструкції для забезпечення відсутності овальності та конусності циліндричного дзвона. Витіснювач виготовляється з використанням набору плоско-паралельних кінцевих мір довжини. За допомогою лінійних вимірювань виготовляють однакові прямокутні пластини, з яких формують дзвоновий витіснювач у формі паралелепіпеда. При цьому процедура метрологічної атестації та визначення відтворюваного контрольного об'єму зводиться до обчислення об'єму паралелепіпеда. Разом з тим, застосування скла має також ряд переваг. По-перше, коефіцієнт лінійного розширення скла у декілька разів менший від металу. По-друге, поверхня скла значно гладкіша та має меншу шорсткість у порівнянні з металом, тому можна вважати, що час стікання мастила, після підняття дзвона у верхнє положення, з скляних стінок буде меншим, у порівнянні з металом, а це в свою чергу не вносить додатковий вплив на зміну маси дзвонової витіснювача у процесі калібрування лічильника газу. По-третє, на торцевій поверхні витіснювача, який опускається в рідину гідрозамка доцільно сформувати фаску з гострим кутом, яка зменшить лобовий опір витіснювача.

Окремого дослідження вимагає компенсаційна протитяга дзвонової витіснювача. При використанні типової конструкції витіснювача у формі циліндра відносно важко повністю компенсувати вагу дзвона в процесі його опускання, оскільки для повної компенсації потрібно застосувати протитягу ідентичну витіснювачу. При реалізації удосконаленої конструкції вплив протитяги можна виключити, оскільки витіснювач представляє собою набір чотирьох ідентичних прямокутних пластинок, тому протитягу можна виготовити з ідентичних пластинок (рис. 1). В даному випадку дзвін повністю збалансований і зрівноважений, оскільки протитяга, яка опускається в мастило під час підняття дзвона, еквівалентна дзвоновому витіснювачу по об'єму і по масі.

Таким чином виключається основна складова зміни контрольного витісненого об'єму газу через підняття рівня мастила під дзвоном в процесі проведення калібрування. Основною проблемою при цьому залишається стабільність тиску під дзвоном під час його опускання, це зумовлено зміною маси дзвона через зміну довжини з'єднувального елемента, яким дзвін з'єднаний з противагою.

З точки зору гідравліки, відмінностей дзвонів у формі циліндра та паралелепіпеда формально немає, оскільки один з основних параметрів, який визначає характер потоку і пропускну здатність – це гідравлічний діаметр  $D$ , який визначається як [5]:

$$D = 4 \cdot S / P, \quad (1)$$

де  $S$  – площа поперечного перерізу потоку,

$P$  – периметр поперечного перерізу потоку.

Таким чином, для дзвона у формі циліндра та паралелепіпеда гідравлічний діаметр однаковий. Відповідно, можна стверджувати, що на виході дзвона в під'єднувальний трубопровід буде сформований ідентичний потік, який не впливає на процес калібрування.

Додатковою перевагою використання замкненого циклу переміщення газу є зменшення впливу випаровуваності рідини гідрозамка. Газ, який циркулює в системі насичений випарами рідини, об'єм якої, за умов підтримання стабільних кліматичних умов, не змінюється.

Для забезпечення автоматизації процесу вимірювання, установку необхідно обладнати телеметричною інформаційно-вимірною системою, функціонування якої передбачено в барокамері. Система повинна вимірювати тиск, температуру, переміщення дзвонів мірника та контролювати кут нахилу дзвона.

З метою оцінювання апріорної невизначеності удосконаленої дзвонів установки необхідно сформулювати рівняння відтворення та передавання одиниць об'єму та об'ємної витрати газу. Рівняння відтворення одиниці об'єму газу можна представити у вигляді формули визначення об'єму паралелепіпеда. При чому поправку на зміну рівня мастила при опусканні дзвона не потрібно вносити за рахунок внесення конструктивних змін.

Відповідно рівняння передавання одиниці об'єму газу має вигляд:

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} \cdot \frac{K_2}{K_1}, \quad (2)$$

де  $V_2, V_1$  – об'єм газу в лічильнику та дзоні;  $P_1, P_2, T_1, T_2, K_1, K_2$  – тиски, температури та коефіцієнти стискуваності газу в дзоні та лічильнику.

Для розрахунку значення надлишкового тиску газу, який заміщає дзвонів витіснювач в барокамері, необхідно оцінити втрати тиску в трубопрово-

дах системи застосовуючи рівняння Бернуллі для двох перерізів трубопроводу [5]:

$$P_1 + \rho_g \cdot g \cdot h_1 + \frac{\alpha_1 \cdot \rho_g \cdot v_1^2}{2} = \\ = P_2 + \rho_g \cdot g \cdot h_2 + \frac{\alpha_2 \cdot \rho_g \cdot v_2^2}{2} + P_B, \quad (3)$$

де  $P_1$  – абсолютний статичний тиск під дзвоном, приймаємо  $P_1 = (1000000 + 101325)$  Па;  $P_2$  – абсолютний статичний тиск в ділянці трубопроводу після місцевого опору;  $\rho_g \cdot g \cdot h$  – гідростатичний тиск, зумовлений висотою стовпа газу  $h$  та його густиною  $\rho_g$ ;  $\alpha \cdot \rho_g \cdot v^2 / 2$  – швидкісний напір, спричинений швидкістю газу  $v$  з коефіцієнтом енергії потоку  $\alpha$ ;  $P_B$  – втрати тиску при переході з перерізу 1 в переріз 2, які, при нехтуванні втрат по довжині трубопроводів, визначаються за такою залежністю:

$$P_B = \xi \cdot \rho_g \cdot v^2 / 2, \quad (4)$$

де  $\xi \cdot \rho_g \cdot v^2 / 2$  – втрати тиску через місцевий опір в залежності від коефіцієнта місцевого опору  $\xi$ .

Для дзвонів установки з контрольним відтворюваним об'ємом  $1 \text{ м}^3$  допустима об'ємна витрата може становити  $2,78 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$  ( $100 \text{ м}^3/\text{год}$ ). Розрахункові втрати тиску, які спричинені місцевими опорами у вигляді раптового звуження потоку при виході з дзвона в трубопровід  $0,05 \text{ м}$ , двох колін з кутом  $90^\circ$  визначалися за формулами (3), (4) і склали сумарно не більше  $1,5 \text{ кПа}$ .

Для лічильника газу втрати тиску визначалися за формулою:

$$P_{BL} = \Delta P_0 \cdot \frac{\rho_g}{\rho_c} \cdot P_L \cdot \left( \frac{q}{q_{\max}} \right)^2 \cdot \left( \frac{293,15}{T_2} \right), \quad (5)$$

де  $\Delta P_0$  – втрати тиску в лічильнику газу, отримані при дослідженні на низькому тиску;  $P_L$  – абсолютний тиск на вході в лічильник, визначається як:  $P_1 - 1500 = 1099825$  Па;  $\rho_c$  – густина середовища, на якому проводили дослідження;  $q$  – значення об'ємної витрати газу, при якому визначають втрати тиску;  $q_{\max}$  – максимальна об'ємна витрата лічильника газу.

Відповідно, загальні втрати тиску в установці з врахуванням максимальних втрат тиску в лічильнику на рівні  $2500$  Па складають  $1097325$  Па.

На основі досліджених втрат тиску доцільно визначити зміну температури газу за час заміру. Температура газу в лічильнику визначається на основі рівняння політропного процесу [3]:

$$T_2 = T_1 \cdot (P_2/P_1)^{\frac{n-1}{n}}, \quad (6)$$

де  $n$  – коефіцієнт політропи, для багатоатомного газу  $n = 1,33$ .

Відповідно, температура  $T_2$  рівна  $292,89 \text{ К}$ .

Таким чином можна розрахунковим способом спрогнозувати невизначеність передавання одиниць об'єму та об'ємної витрати газу дзвоною установкою при роботі при високому надлишковому тиску. Розрахунок невизначеності передбачає використання апріорних даних систематичного характеру, отриманих з технічної документації на давачі. Для цього необхідно визначити вагові внески складових по формулі (2).

Коефіцієнти впливу визначаються як часткові похідні функції (2), за умови таких вхідних значень змінних:

$$\begin{aligned} V_1 &= 1 \text{ м}^3, P_1 = 1101325 \text{ Па}, P_2 = 1097325 \text{ Па}, \\ T_1 &= 293,15 \text{ }^\circ\text{C}, T_2 = 292,89 \text{ }^\circ\text{C}, \\ K_1 &= 0,9748, K_2 = 0,9749. \end{aligned}$$

Формула для розрахунку апріорної розширеної невизначеності передавання одиниці об'єму газу при високому тиску за типом В:

$$U_{VPB} = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial V_1} \cdot U_V\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial P_1} \cdot U_P\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial P_2} \cdot U_P\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T_1} \cdot U_T\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T_2} \cdot U_T\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial K_1} \cdot U_K\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial K_2} \cdot U_K\right)^2} \quad (7)$$

де  $U_V$  – невизначеність відтворення одиниці об'єму газу при високому тиску;  $U_P$ ,  $U_T$  – невизначеність вимірювання тиску та температури;  $U_K$  – невизначеність розрахунку коефіцієнта стискуваності.

Апріорна розширена невизначеність відтворення одиниці об'єму газу повинна становити на рівні 0,02%, при цьому розширена невизначеність передавання одиниці об'єму газу та одиниці об'ємної витрати газу з врахуванням складової невизначеності вимірювання часу складе 0,09%.

## ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ КАЛИБРОВОЧНОЙ УСТАНОВКИ КОЛОКОЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ РАБОТЫ ПРИ ВЫСОКОМ ИЗБЫТОЧНОМ ДАВЛЕНИИ

И.С. Петришин, Т.И. Присяжнюк, А.А. Бас

Статья посвящена разработке усовершенствованной конструкции установки колокольного типа для возможности работы при высоком избыточном давлении. Предложена конструкция вытеснителя в форме параллелепипеда, который изготовлен из стекла. Для работы установки при высоких избыточных давлениях колокольный вытеснитель заключен в барокамеру. Оценена априорная неопределенность передачи единиц объема и объемного расхода газа при высоком давлении колокольной установкой.

**Ключевые слова:** неопределенность, колокольная установка, объем газа, объемный расход газа, высокое давление, калибровка.

## BELL PROVER UNCERTAINTY ESTIMATION OPERATED AT A HIGH OVERPRESSURE

I.S. Petryshyn, T.I. Prisyazhnyuk, O.A. Bas

Article is devoted to the development of improved design of the facility for bell prover ability to work at a high overpressure. The design of the displacer in the form of a parallelepiped, which is made of glass is proposed for the operation of the prover at high pressures the bell displacer enclosed in a pressure chamber. A priori uncertainty transfer unit gas volume and gas volume flow rate at high pressure bell prover is reviewed.

**Keywords:** uncertainty, bell prover, gas volume, gas flow rate, high pressure, calibration.

## Висновок

Розроблена удосконалена конструкція установок дзвоного типу з можливістю роботи при високому надлишковому тиску.

Технічна реалізація полягає в розміщенні установки в барокамері, яку заповнюють високим тиском. Зазначені недоліки типової конструкції дзвоного витіснювача у вигляді циліндра, запропоновано виготовити витіснювач зі скла у формі паралелепіпеда. Досліджено втрати тиску в трубопроводах установки та зміну температури газу за час заміру. Розрахунковим способом оцінено апріорну невизначеність передавання одиниць об'єму та об'ємної витрати газу при високому тиску дзвоною установкою.

## Список літератури

1. *Технічні аспекти створення еталонної бази для метрологічного забезпечення лічильників газу в експлуатації* / І.С. Петришин, П.Я. Джочко, Т.І. Присяжнюк, О.А. Бас // *Український метрологічний журнал*. – 2013. – № 1. – С. 50 – 55.
2. *Петришин І.С. Вимірювання тиску* / І.С. Петришин, Б.М. Сафронов. – Івано-Франківськ: Факел, 2004. – 269 с.
3. *Бродин И.С. Объемно-динамический метод измерения расхода и количества газа* / И.С. Бродин, С.А. Чеховский // *Расчет и конструирование расходомеров* / Под ред. П.П. Кремлевского. – Л.: Машиностроение, 1978. – 224с.
4. *Метрологія. Установки повірочні дзвоного типу. Типова програма та методика державної метрологічної атестації: МДУ-025/03-2006.* / І.С. Петришин, М.В. Кузь, Я.В. Безгачнюк [та ін.] – [Чинна від 2006-05-18]. – Івано-Франківськ: ДП «Івано-Франківськстандарт-метрологія», Укрметртестстандарт, 2006. – II, 45 с.
5. *Френкель Н.З. Гидравлика* / Н.З. Френкель. – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 456 с.

Надійшла до редколегії 22.12.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. П.М. Райтер, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ