

УДК 681.121

Рак А.М., Коробко І.В., д.т.н., доц.
НТУУ «Київський політехнічний інститут» м. Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ТИСКУ В УСТАНОВЦІ ДЗВОНОВОГО ТИПУ З КЕРОВАНИМ РУХОМ МІРНИКА

Rak A., Korobko I.
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (i.korobko@kpi.ua)

PRESSURE STABILITY INVESTIGATION OF BELL PROVER PLANT WITH GAUGING TANK CONTROLLED MOVEMENT

Стаття направлена на створення високоточного метрологічного забезпечення засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу, а саме дзвонових еталонних установок. Проведено аналіз основних факторів, що впливають на точність вимірювання та відтворення витрати газу, і оцінено вплив флуктуацій тиску у просторі під мірником метрологічної установки дзвонового класу. Запропоновані практичні рішення підвищення точності дзвонової метрологічної установки шляхом забезпечення квазістабільності тиску під мірником шляхом застосування сервопривода для керування рухом дзвону. Це мінімізує тривалість перехідного процесу та надає можливість досягти оптимального використання внутрішнього об'єму мірника при відтворенні об'єму та об'ємної витрати газу.

Ключові слова: природний газ, вимірювання, об'єм та об'ємна витрата, метрологічне забезпечення.

Вступ. Постановка проблеми

Питання достовірного обліку паливно-енергетичних ресурсів в умовах їх дефіциту і високої вартості на світовому та вітчизняному ринках, відноситься до пріоритетних в забезпеченні енергетичної безпеки та незалежності держави. Отримання достовірних результатів вимірювань, передбачає підвищення їх точності для реалізації ефективних проєктів енергозаощадження, що в свою чергу, визначає надзвичайну актуальність двох ключових питань: використання новітніх високоточних засобів вимірювання витрати і кількості та реалізація їх метрологічного забезпечення.

У вітчизняній метрологічній практиці для вимірювання і відтворення об'єму та об'ємної витрати газу широкого застосування набули дзвонові еталонні установки завдяки простоті їх конструкції та експлуатації і задовільних метрологічних характеристик. Дослідженню питань підвищення точності витратовимірювальних установок такого типу присвячено достатню велику кількість наукових праць вітчизняних та закордонних вчених, серед яких можна відзначити Є.П.Пістуна, О.Є. Середюка, І.С. Бродіна, І.С.Петришина та Б.І. Пруднікова. Дзвонова витратовимірювальна установка реалізує принцип перетворення величини лінійного розміру, внаслідок руху дзвону, у витіснений об'єм газу. Основним вузлом подібних установок є дзвоновий мірник, що занурений нижньою частиною в ємність з рідиною. Для наповнення газом піддзвонового простору відбувається підняття дзвонового мірника, після чого, при його опусканні у гідрозатвор, створюється потік газу крізь трубопровід, що зв'язує піддзвоновий простір із досліджуємим засобом вимірювальної техніки (ЗВТ). Об'єм, що витісняється, може бути описаний рівнянням

$$V = f(S, z), \quad (1)$$

де z – вертикальне переміщення дзвону;

S – площа поперечного перетину дзвонового мірника.

Постановка задачі

Одним з основних недоліків дзвонових установок є їх порційно-статичний режим роботи, тобто неусталений режим функціонування як ЗВТ, так і самої установки не може бути повністю вилучений з циклу передачі розміру одиниці об'єму. Це зумовлює необхідність збільшення тривалості вимірювання за рахунок збільшення об'єму дзвонового мірника, що в свою чергу створює додаткові перешкоди для досягнення високої точності вимірювань: трудомісткість виготовлення мірника та підтримання постійного рівня затворної рідини у баку резервуара, складність досягнення сталих значень тиску та температури газу під дзвоновим мірником внаслідок зростання його лінійних розмірів та неточності системи компенсації плавучості, тощо.

Ще одним джерелом похибок дзвонів установок є змінність тиску у піддзвонівому просторі. Аналітичні залежності для кількісної та якісної оцінки цього впливу, що може суттєво впливати на величину основної розширеної невизначеності вимірювання, наведено в [1, 2].

Метою даної статті є дослідження та аналіз впливу на значення основної похибки вимірювання та відтворення об'єму газу додаткової похибки, зумовленої зміною тиску у піддзвонівому просторі за цикл вимірювань установкою дзвонів типу з керованим рухом мірника.

Оцінювання впливу нестабільності тиску у піддзвонівому просторі на похибку установки

Суттєвою відмінністю досліджуємої установки від подібних пристроїв класичного виконання, в яких дзвонівий мірник рухається донизу під власною вагою, полягає у керуванні рухом дзвонівого мірника шляхом застосування сервопривідного механізму, що визначає та стабілізує швидкість його руху.

Додатково установка має систему стабілізації рівня затворної рідини, що складається з каліброваної противаги та компенсаційного резервуару. Ця система базується на наслідку закону Паскаля, згідно з яким однорідна рідина у сполучених посудинах будь-якої форми знаходиться на однаковому рівні, та на сталості сумарного об'єму дзвону і противаги, занурених у затворну рідину.

Для установок дзвонівого типу класичного конструктивного виконання баланс сил статичної рівноваги мірника можна представити виразом [3]

$$F_{ДЗ} + F_{КТ} - F_{ПВ} - F_A - F_{ОП} = 0, \quad (2)$$

де $F_{ДЗ} = m_{ДЗ} \cdot g$ – вага дзвонівого мірника; $m_{ДЗ}$ – маса мірника; g – прискорення вільного падіння; $F_{КТ}$ – сила, зумовлена системою компенсації плавучості (сили Архімеда); $F_{ПВ} = m_{ПВ} \cdot g$ – сила, що створюється вагою противаги; $m_{ПВ}$ – маса противаги; F_A – сила Архімеда, що діє на занурену в гідрозатвор частину дзвонівого мірника; $F_{ОП} = P \cdot S$ – сила опору, що виникає внаслідок тиску газу P на дно дзвонівого мірника площею S .

Аналіз рівняння (2) показує, що складові $F_{ДЗ}$ та $F_{КТ}$ є сталими величинами, що задаються при проектуванні установки виходячи з умов досягнення необхідного значення тиску в піддзвонівому просторі. В такому разі, рівновага дзвону визначається точністю роботи пристрою компенсації плавучості, що відтворює силу $F_{КТ}$. Цим досягається постійність різниці сил $F_{ДЗ} - F_{ПВ}$ за будь-якого ступеня занурення дзвонівого мірника, та стабільністю тиску в піддзвонівому просторі, чим забезпечується стабільність сили опору $F_{ОП}$. В той же час, у виразі (2) не враховуються зміна сил гідравлічного опору, що залежать від величини зануреного об'єму дзвонівого мірника та швидкості його руху, а також зовнішні механічні впливи (тертя, вібрації, граничні ефекти на межі розділення затворної рідини та металу дзвону, тощо), які зазвичай мають випадковий характер, що ускладнює їх математичне моделювання та теоретичну оцінку.

Для установки РЕОВГ–02 виробництва ВАТ «Промприлад» співвідношення величин $F_A / F_{ОП}$ за робочого значення надлишкового тиску та повного занурення дзвонівого мірника при повній відсутності системи компенсації плавучості, становить $7,74 \cdot 10^{-2}$, а отже незмінність тиску в піддзвонівому просторі, що моделює силу $F_{ОП}$ є визначальною для досягнення стабільності процесу відтворення витрати.

Для досягнення стабільного значення тиску у піддзвонівому просторі запропоновано використовувати метод керованого руху мірника (рис. 1).

Для досліджуваної установки залежність (2) можна представити виразом

$$F_{ДЗ} - F_{ПВ} - F_A + F_{АПВ} - F_{ОП} - F_{ПР} = 0, \quad (3)$$

де $F_{АПВ}$ – сила Архімеда, що діє на калібровану противагу при її зануренні; $F_{ПР}$ – сила, зумовлена роботою сервоприводу.

Оскільки площа поперечного перерізу у кожному умовному перетині для каліброваної противаги та дзвонівого мірника рівні, а також враховуючи характер їх обернено пропорційного руху, за рахунок чого вага противаги зростає пропорційно зануренню дзвонівого мірника і навпаки, справедливим є вираз

$$F_A = -F_{АПВ}. \quad (4)$$

З врахуванням залежності (4) вираз (3) набуде виду

$$F_{ДЗ} = F_{ПВ} + 2F_A + F_{ОП} + F_{ПР}. \quad (5)$$

Таким чином, компенсація зміни ваги дзвонівого мірника відбувається за рахунок дії змінного зусилля $F_{ПР}$, що справедливо, коли дзвін рухається донизу за умови $F_{ДЗ} > F_{ПВ} + 2F_A + F_{ОП}$. Це накладає обмеження на максимальну величину надлишкового тиску у піддзвонівому просторі.

Практичне забезпечення сталості швидкості руху мірника реалізується з використанням сервопривода, дія якого базується на алгоритмах векторного керування з вбудованим давачем швидкості обертання ротора та

мікропроцесорним блоком керування. Сучасні системи двигунів з векторним керуванням забезпечують стабільність швидкості обертання валу в межах сотих доль відсотка у діапазоні швидкостей 1:1000 і більше.

Забезпечення незмінності значення тиску в піддзвоновому просторі $P(v)$, за умови сталого значення суми правої частини виразу (5), незалежно від зміни величини зусиль F_A та F_{OP} , реалізується за рахунок програмного керування величиною споживаного струму двигуна у реальному часі.

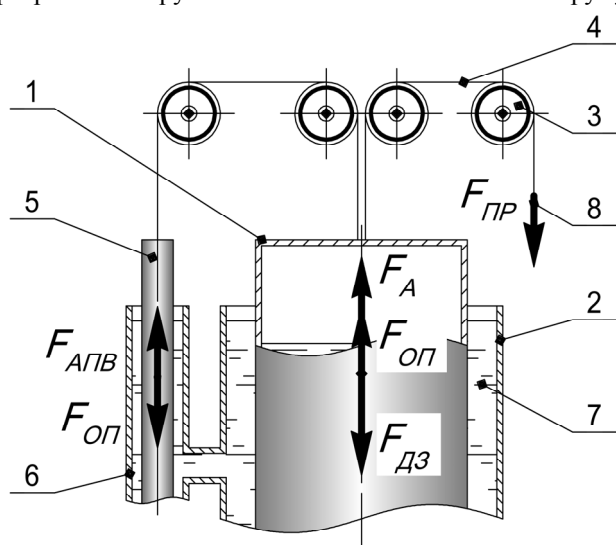


Рис. 1. Принципова схема дзвонів вимірювальної установки з керуванням рухом мірника

- 1 – дзвоний мірник; 2 – основний резервуар;
3 – напрямні шківни; 4 – гнучкий металевий зв'язок;
5 – калібрована противага; 6 – додатковий резервуар;
7 – затворна рідина; 8 – точка прикладення зусилля сервопривода

Додатково для оцінки похибки вимірювання застосовувався дещо видозмінений алгоритм, що базується на порівнянні контрольного об'єму газу, відрахованого за допомогою контрольної лінійки, з фактичним дійсним об'ємом газу, що надійшов до досліджуваного приладу [3]. Цей об'єм газу у диференціальному вигляді може бути описаний наступним рівнянням:

$$dV_A = dV_Z + dV_P, \quad (8)$$

де dV_A – дійсний елементарний об'єм газу, що надійшов до досліджуваного приладу; dV_Z – об'єм газу, що витіснюється дзвоном; dV_P – зміна контрольного об'єму, зумовлена флуктуаціями тиску у піддзвоновому просторі за вимірювальний цикл.

Елементарний об'єм газу, що витісняється дзвоном, пропорційний його площі S та елементарному вертикальному переміщенню дзвону dz і описується залежністю:

$$dV_Z = S \cdot dz. \quad (9)$$

Під час опускання дзвонів мірника тиск під ним $P(v, z)$ залежить від швидкості руху v та величини переміщення z . Оскільки $v = f(z)$ та $v = \frac{dz}{dt}$, то закон зміни тиску у піддзвоновому просторі можна описати функцією $P(v)$. Додатково цьому сприяє наявність у конструкції установки системи компенсації зміни рівня затворної рідини, що мінімізує вплив величини переміщення z на значення тиску.

Зміну елементарного об'єму внаслідок зміни тиску dV_P можна знайти, виходячи з диференціальної форми рівняння стану газу для ізотермічного процесу

$$dV_P = -\frac{dV_Z}{P(v)} dP, \quad (10)$$

де $P(v)$ – функціональна залежність тиску у піддзвоновому просторі від швидкості опускання мірника v ; dP – зміна тиску за час витіснення елементарного об'єму dV_Z .

Враховуючи вирази (9) та (10) залежність (8) після перетворення набуде виду

Визначення похибок дзвонів вимірювальної установки δ_P від флуктуації величини тиску можна здійснювати за виразом [3]

$$\delta_P = -\left(\frac{V_3}{V_K} \ln \frac{P_0}{P_0 + \Delta P} + \frac{P_0}{\Delta P} \ln \frac{P_0}{P_0 + \Delta P} + 1\right) \cdot 100\%, \quad (6)$$

де V_3 – загальний об'єм газу, що міститься в піддзвоновому просторі; V_K – контрольний об'єм газу; P_0 – значення абсолютного тиску в піддзвоновому просторі; ΔP – зміна абсолютного тиску при відтворенні контрольного об'єму.

У роботі [3] наведена інша залежність для визначення похибки установки

$$\delta_P = -\frac{P_0}{(P_0 + \Delta P)^2} \cdot \Delta P \cdot 100\%. \quad (7)$$

Оцінювання похибок за виразами (6) та (7) базуються на значеннях тиску P_0 перед вимірюванням та його прирості ΔP за час дослідження, але не враховуються локальні флуктуації та характер зміни тиску у піддзвоновому просторі, що обмежує область їх застосування. Варто також зазначити, що локальні коливання тиску під час вимірювання мають знакозмінний характер, а отже певною мірою взаємно компенсуються за період вимірювання.

$$dV_A = S \cdot dz \left(1 - \frac{dP}{P(v)} \right). \quad (11)$$

З врахуванням (8) елементарна відносна похибка $d\delta_P$, що вноситься зміною тиску dP при відтворенні об'єму dV_A описується рівнянням

$$d\delta_P = \left(\frac{dP}{P(v)} \right) \times 100\%. \quad (12)$$

Сумарна похибка $\delta_{\Delta P}$, що вноситься флуктуаціями тиску у підзвоновому просторі, визначається шляхом інтегрування залежності (12) по z , що описує величину переміщення дзвону при відтворенні об'єму V_A :

$$\delta_{\Delta P} = \int_0^{\bar{z}} \left(\frac{\Delta P}{P(v)} \right) dz. \quad (13)$$

Залежність тиску у підзвоновому просторі від швидкості опускання мірника $P(v)$ визначено шляхом апроксимації графічної функціональної залежності експериментально отриманих значень тиску у підзвоновому просторі для конкретного режиму роботи установки, що відповідає визначеній швидкості руху дзвонового мірника (рис.2-рис.4) поліномом 6-го порядку

$$P(v) = A_6 v^6 + A_5 v^5 + A_4 v^4 + A_3 v^3 + A_2 v^2 + A_1 v + A_0, \quad (14)$$

де A_n – коефіцієнти апроксимаційного полінома, що залежать від швидкості опускання дзвонового мірника v та параметрів конструкції установки і визначаються дослідним шляхом.

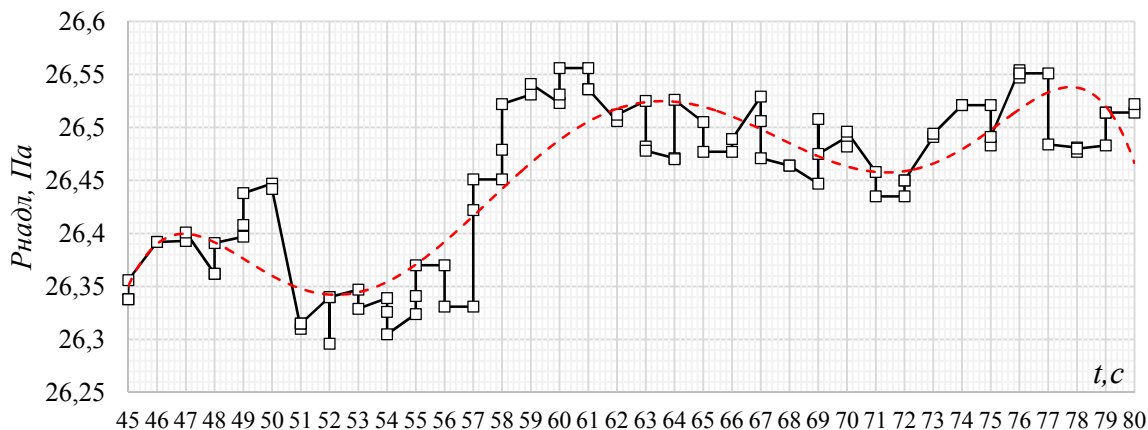


Рис. 2. Графічна залежність тиску у підзвоновому просторі $P(v)$ та її апроксимація при $Q=10 \text{ м}^3/\text{год}$, $\bar{v}=7,511 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$

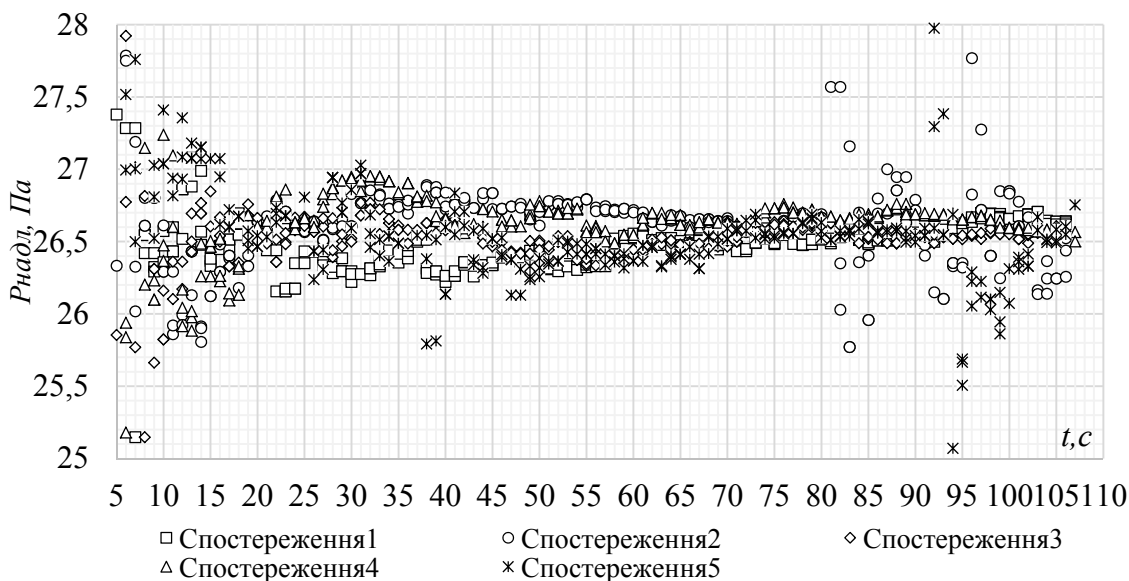


Рис. 3. Розподіл значень тиску для п'яти незалежних спостережень за об'ємної витрати $Q=10 \text{ м}^3/\text{год}$



Рис. 4. Розподіл значень тиску для п'яти незалежних спостережень за об'ємної витрати $Q=40 \text{ м}^3/\text{год}$

При роботі установки сили гідравлічного опору опусканню мірника зростають пропорційно швидкості переміщення дзвону, а відповідно, і відтворюваній витраті.

Для аналізу було обрано масиви значень тиску, які реєструвалися протягом вимірювального циклу для об'ємних витрат $6,5 \text{ м}^3/\text{год}$, $10 \text{ м}^3/\text{год}$, $16 \text{ м}^3/\text{год}$, $25 \text{ м}^3/\text{год}$, $40 \text{ м}^3/\text{год}$ та $65 \text{ м}^3/\text{год}$. Для кожної з вищезгаданих витрат було проведено п'ять незалежних спостережень величини перепаду тиску ΔP за вимірювальний цикл від величини об'ємної витрати (рис.5).

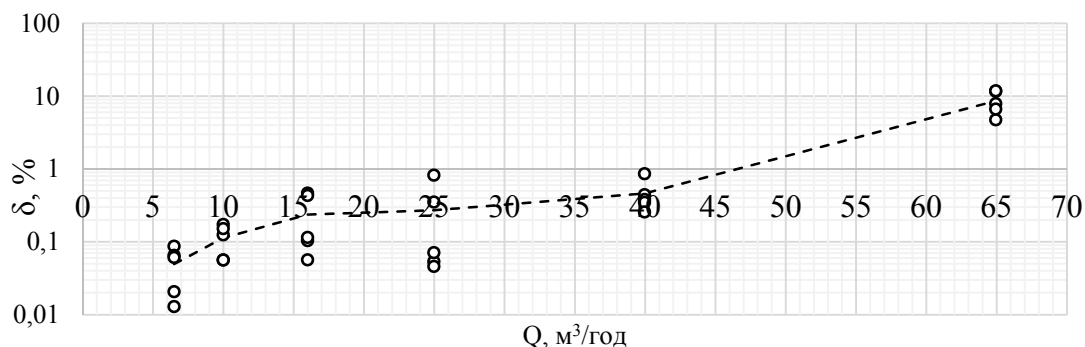


Рис. 5. Залежність перепаду тиску ΔP від об'ємної витрати Q

Для кожної з вищенаведених величин об'ємної витрати результати вимірювань оцінювалися за алгоритмами, що базуються на рівняннях (6), (7), (13). Результати визначення відносної похибки вимірювань, що вноситься коливаннями тиску у підзвоновому просторі мірника наведено на рис.6

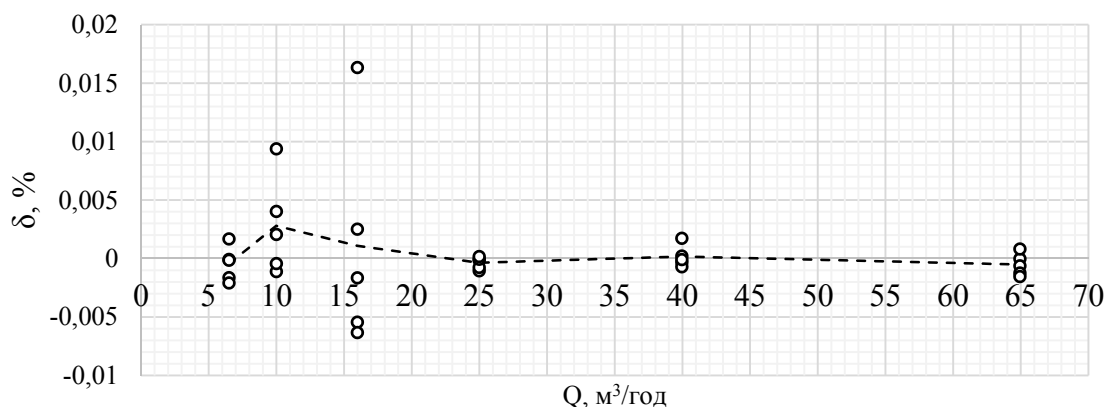


Рис. 6. Залежність величини додаткової δ_{Dr} похибки від об'ємної витрати Q

Висновки

Проведені дослідження вказують на те, що:

- величина перепаду тиску у піддзвоновому просторі має квазімонотонний вигляд протягом вимірювального циклу і зростає зі збільшенням об'ємної витрати;
- конструктивна реалізація керування рухом мірника дозволяє досягти квазістабільного тиску у піддзвоновому просторі протягом всього вимірювального циклу в широкому діапазоні об'ємних витрат;
- величина додаткової похибки $\delta_{\Delta P}$ нелінійно залежить від об'ємної витрати та може досягати значення 0,015%;
- практичною цінністю отриманих результатів є можливість оцінки впливу зміни (флуктуації) тиску у піддзвоновому просторі на основну похибку дзвонової витратовимірювальної установки з керуванням швидкістю руху мірника, що за достатньої кількості експериментальних даних дає можливість отримати багатопараметричну функцію коригування відтвореного об'єму (залежно від алгоритму роботи установки) для врахування змін тиску під дзвоном;
- для досягнення необхідної швидкості руху дзвонового мірника, що мінімізує тривалість перехідного процесу та дає можливість досягти оптимального використання внутрішнього об'єму дзвонового мірника при відтворенні об'єму та об'ємної витрати газу, на підґрунті аналізу масивів значень тиску за різних величин об'ємних витрат, створені сприятливі умови для розробки оптимального алгоритму керування сервоприводом;
- керування рухом дзвонового мірника за умови підтримання стабільності рівня затворної рідини у резервуарі, дозволяє досягти стабільного значення тиску за великих витрат при відсутності системи компенсації плавучості дзвону, що спрощує конструкцію установки і водночас позитивно відображається на її метрологічних характеристиках.

Подальші дослідження дзвонової установки з керуванням рухом мірника направлені на виявлення інших факторів, врахування яких дозволить якісно поліпшити її метрологічні характеристики.

Аннотація. Стаття направлена на создание высокоточного метрологического обеспечения средств измерений объема и объемного расхода газа, а именно колокольных эталонных установок. Проведен анализ основных факторов, влияющих на точность измерения и воспроизведения расхода газа, и оценено влияние флуктуаций давления в пространстве под мерником метрологической установки колокольного класса. Предложены практические решения повышения точности колокольной метрологической установки путем обеспечения квазистабильности давления под мерником путем применения сервопривода для управления движением колокола. Это минимизирует продолжительность переходного процесса и позволяет достичь оптимального использования внутреннего объема мерника при воспроизведении объема и объемного расхода газа.

Ключевые слова: природный газ, измерения, объем и объемный расход, метрологическое обеспечение.

Abstract. The article is focused on creating high-precision measurement assurance of volume and volumetric gas flowrate measurement, in particular the bell provers. The analysis of key factors influencing the measurement accuracy and realization of gas flowrate and assessment of the impact of pressure fluctuations under gauging tank space of metrological plant of bell prover type was conducted. The practical solutions for accuracy increasing of bell prover by ensuring of pressure quasi stability under gauging tank by using servo drive for gauging tank control movement has been suggested. It is minimizes the transient process duration and allows optimal using of interior volume for realization of volume and volumetric gas flowrate.

Keywords: natural gas, measurement, volume and flowrate, metrological support.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Середюк О.Є. Математичне моделювання похибки від непостійності тиску в дзвонових витратовимірювальних установках [Текст]/О.Є. Середюк/ Методи та прилади контролю якості. - 1998.- №2.-С.23-27.
2. Середюк О.Є. Аналіз впливу робочого тиску еталонних дзвонових витратовимірювальних установок на їх метрологічні характеристики [Текст] /О.Є. Середюк, С.А. Чеховський, Б.І. Прудніков/ Методи та прилади контролю якості. - 2001.- №7.- С.111-116.
3. Мельничук С.І Дослідження впливу зміни рівня замкової рідини в установках дзвонового типу на точність відтворення об'єму газу [Текст] /Мельничук С.І./ Методи та прилади контролю якості. - 2002.- №9.-С.82 – 84.

References

1. Seredjuk O.Є Methods and devices of quality control, 1998, no 2, pp.23-27.
2. Seredjuk O.Є. Methods and devices of quality control, 2001, no 7, pp.111-116.
3. Mel'nichuk S.I Methods and devices of quality control, 2002, no 9, pp.82 – 84.

Подана до редакції 14.04.2015