природного газу.

*1. РД 50-213 – 80. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. Москва – 1982. Издательство стандартов. 2. ГОСТ 8.563.2–97 ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Методика выполнения измерений с помощью сужающих устройств. 3. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник. – 4-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1989. – 701 с. 4. IAPWS Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam, IAPWS Secretariat, 1997.*

УДК 389:681.121.089

# ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕТАЛОННИХ ДЗВОНОВИХ ВИТРАТОВИМІРЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК НА ЇХ МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

*© Середюк О.Є., 2006*
*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу*

***Проаналізований вплив геометричних розмірів дзвонових витратовимірювальних установок на виникнення похибки від зміни рівня замкової рідини витіснювача. Запропонований алгоритм для кількісної оцінки цієї похибки і здійснений її чисельний аналіз***

Еталонні дзвонові витратовимірювальні установки (ДВУ) призначені для точного відтворення та вимірювання витрат і об'ємів газу і застосовуються для градуювання та вивіряння витратомірів і лічильників, які є одними з найбільш поширених засобів енергоощадності паливно-енергетичних ресурсів. Достатньо високі метрологічні характеристики цих установок (границя основної допустимої похибки не вище 0,15%), можливість їх конструктивного виконання для функціонування від малих (не більше 10 м$^3$/год) до надвеликих (не більше 10000 м$^3$/год) витрат, а також широкий діапазон (переважно не менше 1:200) відтворюваних витрат забезпечують їх застосування із статусом Державного спеціального [1] і робочих [2, 3] еталонів. Водночас вказані техніко-метрологічні особливості зумовлюють необхідність їх постійного метрологічного дослідження шляхом більш досконалого вивчення і моделювання складових похибки.

Однією із вагомих складових похибки ДВУ, яка є об'єктом детальних досліджень в останні роки, є похибка від зміни рівня замкової рідини у внутрішньому кільцевому резервуарі витіснювача при зануренні дзвона під час відтворення контрольного об'єму газу. Незважаючи на те, що це явище є очевидним з точки зору фізичних процесів і розглядалося в спеціалізованій монографії [4], методично кількісна оцінка цих процесів і їх вплив на метрологічні характеристики ДВУ вперше опубліковані у вітчизняних дослідженнях тільки в 1997р. [1, 5], хоча практичні дослідження цього процесу стосуються апробації геометричного методу градуювання дзвона випробувальної установки на витрати до 1600 м$^3$/год [6].

Актуальність дослідження цього фактору підкреслюється його моделюванням в роботах [7, 8], в яких детально розглянуті фізичні явища при функціонування ДВУ і наведені отримані математичні залежності. Однак допущені неточності в процесі виведення кінцевих рівнянь для розрахунку похибки від зміни рівня замкової рідини не дозволяють з необхідною точністю розрахувати цю похибку і застосувати отримані результати для метрологічної атестації ДВУ. Практична цінність вивчення впливу непостійності рівня рідини на метрологічні характеристики ДВУ підтверджуються врахуванням цього фактору при розробці математичних моделей відтворення контрольних об'ємів дзвоновими установками [9, 10] і при вдосконаленні функіонування їх вузлів, наприклад, вагового компенсатора [11]. Поряд з цим в жодній із вказаних вище публікацій не розглянуті питання чисельного аналізу зміни рівня замкової рідини у взаємозв'язку з метрологічними характеристиками ДВУ.

Метою виконаних наукових досліджень є чисельне моделювання гідравлічних процесів у кільцевому резервуарі витіснювача ДВУ і метрологічний аналіз впливу точності визначення геометричних розмірів конструктивних параметрів установок на їх похибки.

Під час роботи ДВУ (рис.1) спочатку здійснюється підготовча операція наповнення

дзвона 1 від джерела витрати газу через підвідний трубопровід 5 і відкритий клапан 4 (при цьому клапан 7 закритий). Потім клапан 4 закривають, здійснюють витримку часу для стабілізації перехідних тепло- і масообмінних процесів під дзвоном і відкривають клапан 7, який з'єднує відвідний трубопровід 6 з досліджуваним лічильником чи витратоміром газу.

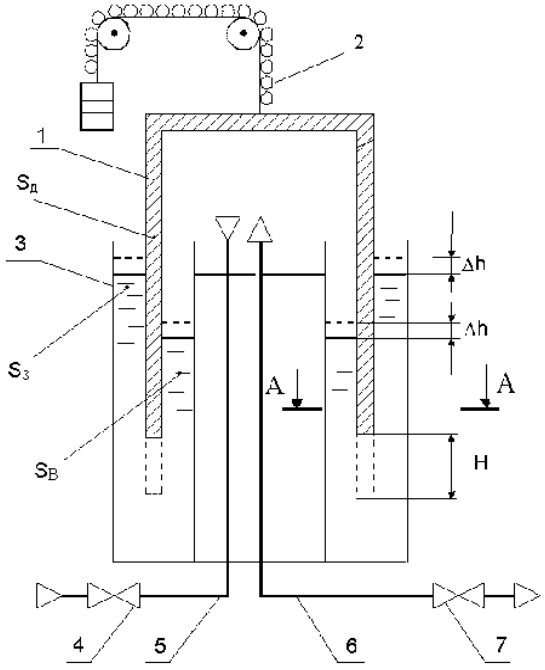



*Рис. 1. Функціональна схема ДВУ*

Опускання дзвона під своєю вагою забезпечує витіснення необхідного контрольного об'єму і порівняння його з об'ємом газу, відліченого за цей інтервал часу досліджуваним приладом. При цьому стабільність відтворюваних витрат забезпечують спеціальні пристрої стабілізації тиску під дзвоном, наприклад, ваговий компенсатор 2, який компенсує зменшення ваги дзвона при зростанні глибини його занурення у замкову рідину витіснювача 3 шляхом пропорційного довантаження дзвона. Однак, не зважаючи на постійність тиску під ним, відбувається зростання рівня замкової рідини в залежності від глибини занурення дзвона. Розрахунок приросту рівня здійснюється виходячи з рівності приросту об'єму рідини витіснювача до приросту об'єму зануреної частини стінки дзвона. При цьому можна використати таку тотожність [5, 11]:

$$\frac{\Delta h}{H} = \frac{S_Д}{S_B + S_3}, \qquad (1)$$

де $S_Д$ – площа поперечного перерізу стінки дзвона; $S_B$, $S_3$ – площі кільцевих перерізів замкової рідини, утворених поверхнями стінок дзвона та внутнішньою і зовнішньою стінкою витіснювача відповідно; $\Delta h$ – приріст рівня замкової рідини при зануренні дзвона на величину $H$.

Здійснимо чисельне моделювання впливу тотожності (1) на похибку ДВУ. Так як ця похибка зумовлена підняттям рівня під час відтворення дзвоном контрольного об'єму газу і носить систематичний характер, то охарактеризуємо її як невилучену систематичну похибку (НСП) і розрахуємо за формулою

$$\theta_{\Delta V} = \frac{\Delta V}{V_K} 100, \%, \qquad (2)$$

де $\theta_{\Delta V}$ – НСП від зміни рівня замкової рідини; $\Delta V$ – приріст об'єму рідини у внутрішньому кільцевому резервуарі при відтворенні дзвоном контрольного об'єму $V_K$.

Значення об'єму $V_K$ визначається величиною занурення дзвона $H$ (рис.1) і обчислюється за формулою:

$$V_K = \pi R_2^2 H, \qquad (3)$$

де $R_2$ – радіус внутрішньої поверхні стінки дзона (рис.2).

Приріст об'єму $\Delta V$ розраховуємо за формулою [5]:

$$\Delta V = \Delta h \cdot S_B, \qquad (4)$$

в якій $\Delta h$ знаходиться із залежності (1).

Для розрахунку приросту об'єму $\Delta V$ запишемо разом (1) і (4), в яких значення площ $S_Д$, $S_B$, $S_3$ подамо через відповідні радіуси $R_1$, ..., $R_4$ (рис. 2). В результаті отримаємо, що

$$\Delta h = H \cdot \frac{R_3^2 - R_2^2}{(R_2^2 - R_1^2) + (R_4^2 - R_3^2)}, \qquad (5)$$

де $R_1$ – радіус зовнішньої поверхні внутрішньої стінки витіснювача, $R_3$ – радіус зовнішньої поверхні стінки дзвона, $R_4$ – радіус внутрішньої поверхні зовнішньої стінки витіснювача (рис. 2).

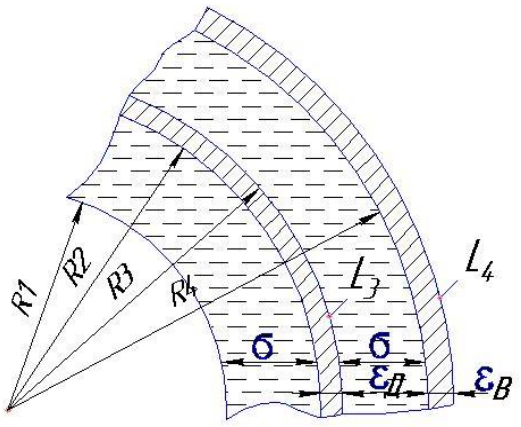



*Рис. 2. Схема перерізу А-А кільцевого витіснювача ДВУ (рис. 1)*

Враховуючи, що при проектуванні ДВУ основними конструктивними параметрами є радіус $R_2$ (визначає діапазон відтворюваних витрат і контрольних об'ємів ДВУ), товщина стінки дзвона $\varepsilon_Д$ (визначає міцність і жорсткість форми дзвона) і ширина $\sigma$ внутрішнього і зовнішнього кільцевих зазорів витіснювача (приймається однаковою для умов моделювання в даній статті і визначає вплив гідродинамічних параметрів замкової рідини на стабільність тиску і відтворюваних витрат ДВУ), подамо вираз (5) через ці параметри:

$$\Delta V = \frac{\pi}{2}\varepsilon_Д H(2R_2 - \sigma), \qquad (6)$$

де

$$\varepsilon_Д = R_3 - R_2, \qquad (7)$$

$$\sigma = R_2 - R_1 = R_4 - R_3. \qquad (8)$$

Тому з врахуванням (3), (6)–(8) формула (2) набуває вигляду:

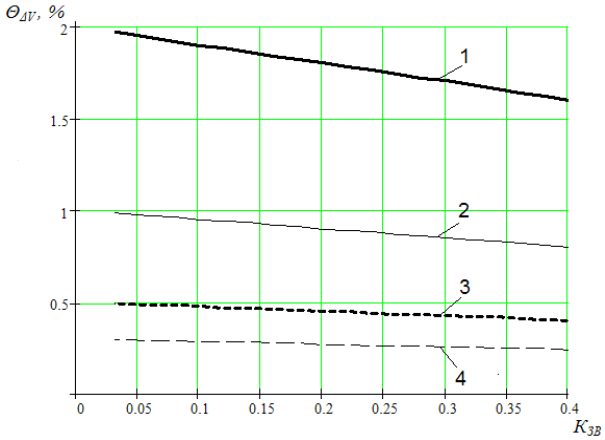
$$\theta_{\Delta V} = \left(\varepsilon_Д / 2R_2^2\right)\cdot\left(2R_2 - \sigma\right)\cdot 100,\ \%. \qquad (9)$$

Для чисельного аналізу похибки $\theta_{\Delta V}$ подамо (9) у безрозмірному вигляді шляхом введення коефіцієнта товщини стінки дзвона $K_{СД} = \varepsilon_Д / R_2$ і коефіцієнта ширини зазору витіснювача $K_{ЗВ} = \sigma / R_2$. При цьому отримаємо таку залежність для розрахунку похибки від зміни рівня замкової рідини:

$$\theta_{\Delta V} = K_{СД}(1 - 0{,}5K_{ЗВ})\cdot 100,\%. \qquad (10)$$

Враховуючи, що реальні значення конструктивних параметрів ДВУ можуть знаходитися в межах $\varepsilon_Д$ = (3…10) мм, $R_2$= (0,5…1,5)м, $\sigma$ = (0,03…0,2)м, діапазон зміни безрозмірних коефіцієнтів $K_{СД}$ і $K_{ЗВ}$ будуть такими: $K_{СД}$ = (0,003…0,02) і $K_{ЗВ}$ = (0,02…0,4). Результати чисельного моделювання (10) подані на рис.3, які свідчать, що похибка $\theta_{\Delta V}$ може сягати до 2% і навіть для найбільш сприятливих умов (тонкостінний дзвін при $K_{СД}$ =0,003 і широкий зазор витіснювача $K_{ЗВ}$ = 0,4) ця похибка становить 0,24%. Це значення є суттєвою складовою похибки ДВУ, яке майже вдвічі перевищує границю основної допустимої похибки (±0,15%) переважної більшості ДВУ. Тому на цю похибку необхідно обов'язково вводити поправку, що практично реалізується у всіх відомих автору установках, дзвін яких градуювався геометричним методом [12].

Водночас введення поправки з метою вилучення похибки $\theta_{\Delta V}$ обґрунтовує доцільність метрологічного аналізу цієї поправки, так як вона буде зумовлювати виникнення похибки $\delta_{\Delta V}$ обчислення приросту контрольного об'єму, що дотепер не враховано в програмах метрологічної атестації ДВУ.




*1 – $K_{СД}$ = 0,02; 2 – $K_{СД}$ = 0,01; 3 – $K_{СД}$ = 0,005; 4 – $K_{СД}$ = 0,003*

*Рис. 3 Результати чисельного моделювання похибки $\theta_{\Delta V}$*

Для кількісної оцінки похибки $\delta_{\Delta V}$ подамо (6) через параметри ДВУ, значення яких визначають прямим методом при метрологічній атестації установок. Такими параметрами будуть товщини стінок дзвона $\varepsilon_Д$ і зовнішнього циліндра витіснювача $\varepsilon_В$ (вимірюються, наприклад, ультразвуковим товщиноміром) і довжини кіл зовнішніх поверхонь стінки дзвона $L_3$ і зовнішнього циліндра витіснювача $L_4$ (вимірюються, наприклад, металевою рулеткою 3-го розряду). Використовуючи вирази

$$R_2 = \frac{L_3}{2\pi} - \varepsilon_Д, \qquad (11)$$

$$\sigma = \frac{L_4 - L_3}{2\pi} - \varepsilon_В, \qquad (12)$$

отримуємо, що

$$\Delta V = \frac{\varepsilon_Д H}{4}(3L_3 - L_4 - 4\pi\varepsilon_Д + 2\pi\varepsilon_В). \qquad (13)$$

Враховуючи, що вираз (13) характеризує визначення $\Delta V$ як результат опосередкованого вимірювання, то обчислимо його похибку у вигляді абсолютної похибки $\Delta_{\Delta V}$ визначення приросту контрольного об'єму. Методологічно розрахунок похибок при непрямих вимірюваннях [13] стосовно виразу (13) може бути проведений за формулою:

$$\Delta_{\Delta V} = \left(\frac{\partial \Delta V}{\partial H}\Delta H^2 + \frac{\partial \Delta V}{\partial \varepsilon_Д}\Delta\varepsilon_Д^2 + \frac{\partial \Delta V}{\partial L_3}\Delta L_3^2 + \frac{\partial \Delta V}{\partial L_4}\Delta L_4^2 + \frac{\partial \Delta V}{\partial \varepsilon_В}\Delta\varepsilon_В^2\right)^{1/2}\cdot K_P, \qquad (14)$$

де $\Delta H$, $\Delta\varepsilon_Д$, $\Delta\varepsilon_В$, $\Delta L_3$, $\Delta L_4$ - абсолютні значення похибок зразкових засобів вимірювальної техніки,

які застосовуються для метрологічної атестації ДВУ; $\partial\Delta V/\partial H$, $\partial\Delta V/\partial\varepsilon_Д$, $\partial\Delta V/\partial\varepsilon_В$, $\partial\Delta V/\partial L_3$, $\partial\Delta V/\partial L_4$ – функції впливу вимірюваних значень $H$, $\varepsilon_Д$, $\varepsilon_В$, $L_3$, $L_4$ на результат опосередкованого вимірювання $\Delta V$ відповідно; $K_P$ – поправний множник, який визначається кількістю складових $m$ у алгоритмі (14) і заданою довірчою ймовірністю обчислення похибки (при $m=5$ і $p=0{,}95$ приймається $K_p=1{,}12$ [13]).

Функції впливу визначаються шляхом диференціювання (13) по відповідних змінних і мають вигляд:

$$\frac{\partial\Delta V}{\partial H}=\frac{\varepsilon}{4}(3L_3-L_4-4\pi\varepsilon_Д+2\pi\varepsilon_В), \qquad (15)$$

$$\frac{\partial\Delta V}{\partial\varepsilon_Д}=H(\frac{3}{4}L_3-\frac{L_4}{4}-4\pi\varepsilon_Д+\frac{\pi}{2}\varepsilon_В), \qquad (16)$$

$$\frac{\partial\Delta V}{\partial L_3}=\frac{3}{4}\varepsilon_Д H, \qquad (17)$$

$$\frac{\partial\Delta V}{\partial L_4}=-\frac{\varepsilon_Д H}{4}, \qquad (18)$$

$$\frac{\partial\Delta V}{\partial\varepsilon_В}=-\frac{\varepsilon_Д\pi}{2}H. \qquad (19)$$

Зважаючи на достатньо громіздкий запис алгоритму (14)-(19) для визначення похибки $\Delta_{\Delta V}$, проводилося чисельне дослідження функцій впливу, яке показало знехтувально малий вплив (більше, ніж на 2 порядки) всіх складових порівняно з функцією $\partial\Delta V/\partial\varepsilon_д$. Подальше її чисельне дослідження показало можливість нехтування у виразі (16) доданками з параметрами $\varepsilon_Д$ і $\varepsilon_В$, що дозволило записати, що

$$\frac{\partial\Delta V}{\partial\varepsilon}\approx\frac{H}{4}(3L_3-L_4). \qquad (20)$$

Таким чином стає можливим записати вираз (14) так:

$$\Delta_{\Delta V}\approx\frac{\partial\Delta V}{\partial\varepsilon_Д}\Delta\varepsilon_Д, \qquad (21)$$

де $\partial\Delta V/\partial\varepsilon_д$ визначається із (20).

Відносна похибка $\delta_{\Delta V}$ обчислення приросту контрольного об'єму по суті є інструментальною і відноситься до НСП. Тому її розрахуємо за формулою:

$$\delta_{\Delta V}=\frac{\Delta_{\Delta V}}{V_K}\cdot 100,\%. \qquad (22)$$

Спільний розв'язок виразів (3), (20)-(22) приводить до такої формули:

$$\delta_{\Delta V}=\frac{\pi(3L_3-L_4)}{L_3^2}\cdot\Delta\varepsilon_Д\cdot 100,\%. \qquad (23)$$

Для чисельного аналізу (23) запишемо довжини кіл $L_3$ і $L_4$ через безрозмірні коефіцієнти $K_{СД}$ і $K_{ЗВ}$:

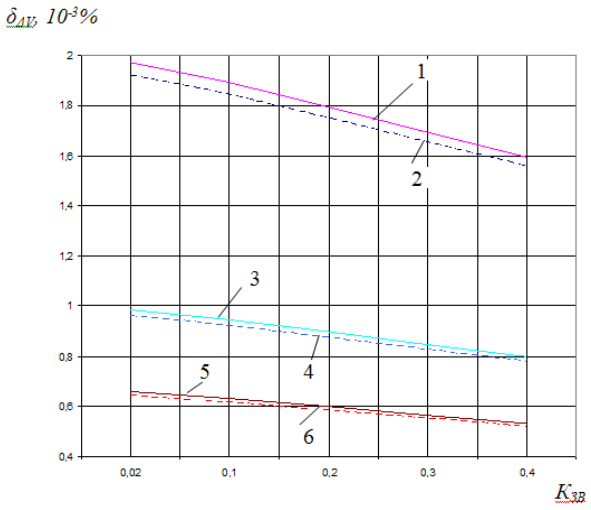
$$L_3=2\pi(R_2+\varepsilon_Д)=2\pi R_2(1+K_{СД}), \qquad (24)$$

$$L_4=2\pi(R_2+\varepsilon_Д+\sigma+\varepsilon_В)=2\pi R_2(1+K_{СД}+K_{ЗВ}). \qquad (25)$$

Тому формула (23) з врахуванням (24) і (25) набуває такого кінцевого вигляду:

$$\delta_{\Delta V}=\frac{2+K_{СД}-K_{ЗВ}}{2(1+K_{СД})_2}\cdot\frac{\Delta\varepsilon}{R_2}\cdot 100,\%. \qquad (26)$$

Як видно із (26) значення похибки $\delta_{\Delta V}$ буде визначатися не тільки значеннями безрозмірних параметрів, але і конкретними геометричними розмірами (радіусами дзвона) і абсолютною похибкою вимірювання товщини його стінки. Тому чисельний аналіз цієї похибки проведений для трьох конкретних значень радіусів дзвона (500, 1000 і 1500мм) за умови застосування найбільш точного вітчизняного ультразвукового товщиноміра УТ-111 [14] з абсолютною похибкою вимірювання ± 0,01мм. Результати аналізу (рис. 4) свідчать, що НСП обчислення приросту контрольного об'єму не перевищує 0,002% для найбільш несприятливого набору параметрів ДВУ і суттєво зменшується при зростанні радіуса дзвона і ширини кільцевого зазору витіснювача. Водночас у випадку неправильного вибору або відсутності товщиноміра необхідної точності ця складова похибки може вирости на порядок, тобто до (0,01-0,02%), що вже може суттєво вплинути на основну похибку ДВУ. З поданих графіків на рис.4 також видно незначний вплив на похибку $\delta_{\Delta V}$ зміни товщини стінки дзвона, тобто параметра $K_{СД}$ при фіксованому значенні радіусів дзвона.




*1 – $R_2$=500; $K_{сд}$=0,003; 2 – $R_2$=500; $K_{сд}$=0,02;*
*3 – $R_2$=1000; $K_{сд}$=0,003; 4 – $R_2$=1000; $K_{сд}$=0,02;*
*5 – $R_2$=1500; $K_{сд}$=0,003; 6 – $R_2$=1500; $K_{сд}$=0,02*

*Рис. 4. Результати чисельного моделювання похибки $\delta_{\Delta V}$*

Наведений метрологічний аналіз похибки $\delta_{\Delta V}$ доповнимо міркуванням, що поданий її метрологічний аналіз стосувався тільки розрахунку НСП. В реальних умовах метрологічної атестації ДВУ необхідно враховувати ще і похибку проведення багаторазових вимірювань параметрів $L_3$, $L_4$, $\varepsilon_Д$, $\varepsilon_B$ [13], яка буде залежати від метрологічних характеристик використаних засобів вимірювальної техніки і фахового рівня спеціалістів з експлуатації даного обладнання.

Проведені дослідження повніше розкривають особливості функціонування ДВУ і сприяють вирішенню прикладних задач їх оптимального проектування. Отримані алгоритми (10) і (26) дають можливість кількісно оцінити похибку від зміни рівня замкової рідини кільцевого витіснювача і забезпечують правильність вибору вимірювальних засобів для досягнення необхідної точності розрахунку поправки шляхом вилучення НСП. Практична реалізація отриманих алгоритмів дозволяє підняти точність метрологічної атестації еталонних ДВУ, в результаті чого досягається підвищення точності вимірювання витрати і об'єму природного газу.

*1. Державний спеціальний еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газу / І.С.Бродин, І.С Петришин, А.Г. Бестелесний, П.І. Дикий // Український метрологічний журнал. – 1997. - №3. – С.31-34. 2. Вимірювання витрати та кількості газу: / М.П.Андрійшин, С.О.Канєвський, О.М.Карпаш, О.Є.Середюк та ін.–Івано-Франківськ:ПП"Сімик", 2004–160с. 3. Вощинський В.С. Робочий еталон об'єму газу дзвонового типу РЕОВГ – 0,2 // Методи та прилади контролю якості. – 2001. - №7. – С.128-129. 4. Павловский А.Н. Измерение расхода и количества жидкостей, газа и пара. – М.: Изд-во стандартов, 1967. – 416с. 5. Петришин І.С., Бестелесний А.Г. Алгоритм оцінки похибок державного спеціального еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газу // Методи та прилади контролю якості. – 1997. - №1. – С.75-79. 6. Середюк О.Е. Испытательная расходоизмерительная установка со стабилизацией давления под колоколом: Дис. ... канд. техн. наук: 05.11.01/ Ивано-Франковский институт нефти и газа. – Ивано-Франковск, 1990. – 254с. 7. Пістун Є.П., Бродин Ю.І. Дослідження впливу зміни рівня замкової рідини в дзвонових установках задання об'єму газу на їх точність // Методи та прилади контролю якості. – 2001. - №7. – С.125-127. 8. Мельничук С.І. Дослідження впливу зміни рівня замкової рідини в установках дзвонового типу на точність відтворення об'єму газу // Методи та прилади контролю якості. – 2002. - №9. – С.82-84. 9. Вощинський В. Математична модель відтворення і задання контрольного об'єму газу установками дзвонового типу // Проблеми економії енергії: Зб. матер. IV Міжнар. наук. – практ. конф. (м. Львів, 8-12 жовтня 2003р.). – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2003. – С.65-67. 10. Середюк О.Є., Середюк Д.О. Дзвонові повірочні установки для побутових і промислових засобів вимірювання витрати // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту імені Володимира Даля. – 2006. – №1 (95). – С.203-207. 11. Середюк О.Є. Вдосконалення алгоритму функціонування вагового компенсатора дзвонових витратовимірювальних еталонів // Наука і освіта 2004: Матеріали VII Міжнар. наук.- практ. конф. Том 63. Технічні науки (м. Дніпропетровськ, 10-25 лютого 2004р.). – Дніпропетровськ: Наука і освіта. – 2004. – С67-69. 12. Середюк О.Є., Чеховський С.А., Прудніков Б.І. Аналіз впливу робочого тиску еталонних дзвонових витратовимірювальних установок на їх метрологічні характеристики // Методи та прилади контролю якості. – 2001. - №7. – С.111-116. 13. Кісіль І.С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань: Навч. посібник. – Івано-Франківськ: Факел, 2002. – 400с. 14. Ультразвуковой толщиномер УТ-111 // www.ntd.com.ua.*