

## МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РІДКОЇ І ГАЗОПОДІБНОЇ ФАЗ

УДК 006.91:681.121

### МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ДЗВОНОВИХ ЕТАЛОННИХ УСТАНОВКАХ

*Д.О. Середюк*

*ДП „Івано-Франківськстандартметрологія”, вул. Вовчинецька, 127, м.Івано-Франківськ,  
76007, e-mail: [sdo\\_if@meta.ua](mailto:sdo_if@meta.ua)*

*Проведений аналіз конструктивних напрямків підвищення стабільності відтворення витрати газу у дзвонових еталонних установках. На базі запропонованого конструктивного вдосконалення здійснене моделювання і чисельний аналіз гідродинамічних процесів замкової рідини у витіснювачі при вимірювальному процесі еталонних установок з обертовими дзвоном та стабілізуючим кільцем.*

*Ключові слова: еталонна установка, дзвін, лобовий опір, стабілізуюче кільце, витрата газу.*

*Выполнен анализ конструктивных направлений повышения стабильности воспроизведения расхода газа в колокольных эталонных установках. На базе предложенного конструктивного усовершенствования осуществлено моделирование и численный анализ гидродинамических процессов затворной жидкости в вытеснителе при измерительном процессе эталонных установок с вращающимся колоколом и стабилизирующим кольцом.*

*Ключевые слова: эталонная установка, колокол, лобовое сопротивление, стабилизирующее кольцо, расход газа.*

*The analysis of constructional directions of increase of stability of recreation of nexpenses of gas in bell standards is conducted. The constructional improvement is based on the modelation and numerical analis of hydrodynamic processes of oil liquid in the displacer at the measuring process of the standards with the bell wich is circulated and antihunt ring are suggested too.*

*Keywords: standard, bell, frontal resistance, antihunt ring, gas expense.*

Дзвонові еталонні установки (ДЕУ) вже впродовж багатьох десятиліть залишаються одними із найбільш точних засобів відтворення і вимірювання об'єму і об'ємної витрати газу. На їх базі створений Державний первинний еталон одиниці об'єму та об'ємної витрати газу України [1], а також багато закордонних національних еталонів [2]. Вказаного типу еталонні установки набули широкого застосування в метрологічному статусі робочих еталонів і повірочних установок, що відображено в чинній Державній повірочній схемі [3]. З урахуванням цих міркувань актуальними є дослідження фізичних процесів в еталонних установках дзвонового типу, що відкриває шляхи їх конструктивного удосконалення з метою підвищення точності як метрологічних засобів для випробування і сертифікації лічильників і витратомірів газу.

Аналіз тенденцій вдосконалення ДЕУ

показав, що вони значною мірою стосуються, насамперед, забезпечення стабільності відтворюваних витрат газу. Адже в сучасних ДЕУ зміна витрати не може перевищувати  $\pm 0,5\%$  – в установках для перевірки побутових лічильників газу,  $\pm 0,3\%$  – в установках для перевірки промислових лічильників газу та  $\pm 0,16\%$  – в робочих еталонах дзвонового типу для перевірки, калібрування та державної метрологічної атестації еталонних лічильників газу [3].

Одним із найбільш суттєвих загальновідомих чинників досягнення стабільності відтворюваних витрат газу в ДЕУ є точність виготовлення дзвона, насамперед постійність поперечного перерізу вздовж висоти, а також досягнення плавності руху дзвона при його зануренні у замкову рідину. Поряд з цим відомо ряд нових технічних напрацювань для досягнення вказаної мети,

наприклад, підвищення стабільності відтворюваних витрат ДЕУ завдяки застосуванню вдосконалених систем центрування і спрямування вертикального переміщення дзвона з використанням постійних магнітів, які попарно закріплені із зазором на корпусі рухомого дзвона і нерухомих напрямних стійок [4]. У зв'язку з тим, що стабільність відтворюваних витрат залежить від тиску під дзвоном в патенті [5], пропонується сифонний компенсуючий пристрій зміни ваги дзвона доповнювати реверсивним вентилятором для додаткової подачі або відбирання повітря із піддзвонового простору.

Дослідження фізичних процесів в ДЕУ показало також, що одним із факторів, які суттєво впливають на точність дзвонових установок є нестійкість сил лобового опору переміщенню дзвона у замковій рідині витіснювача. Для зменшення цих сил опору запропоновані конструкції дзвонових витратовимірювальних установок, в яких дзвін обертається навколо своєї вертикальної осі [6,7]. Обертання дозволяє не тільки зменшити сили лобового опору, але і сприяє підвищенню точності і розширенню границь вимірювання шляхом підвищення стійкості дзвона до поперечних коливань внаслідок виникаючого гіроскопічного моменту.

Відомими також є конструкції ДЕУ, в яких до нижньої частини дзвона під'єднане стабілізуюче кільце з отворами для стабілізації гідродинамічних сил опору його переміщенню у замковій рідині витіснювача [8], завдяки чому досягається рівномірне переміщення дзвона і стабілізується витрата повітря на виході ДЕУ.

Однак головною проблемою для досягнення стабільності відтворюваних витрат є необхідність реалізації коригування тиску відповідно до вибраного режиму роботи ДЕУ. Крім того, в еталоні необхідно стабілізувати з високою точністю тиск під дзвоном внаслідок нелінійного зростання сил гідродинамічного опору переміщенню дзвона при збільшенні глибини його занурення у замкову рідину кільцевого витіснювача і при наближенні дзвона до дна кільцевого витіснювача.

Для покращення функціонування ДЕУ запропоновано кільцевий витіснювачем із замковою рідиною додатково оснастити стабілізуючим кільцем, яке кінематично зв'язане з електроприводом його обертання відносно вертикальної осі дзвона, а також одночасно обладнати електропривід задавачем його функціонування у відповідності до режиму роботи ДЕУ [9].

Метою роботи є моделювання фізичних

процесів у кільцевому витіснювачі ДЕУ з обертючим стабілізуючим кільцем.

Розглянемо фізичні процеси, зокрема гідродинамічні, у кільцевому витіснювачі ДЕУ впродовж вимірювального циклу при опусканні обертючого дзвона за наявності обертючого стабілізуючого кільця в нижній частині витіснювача.

На рис. 1 наведена схема досліджуваної ДЕУ, яка складається з дзвона 1, що обертається навколо осі  $z$  і який розміщений у кільцевому витіснювачі 2 із замковою рідиною. У витіснювачі знаходиться стабілізуюче кільце 3, яке також обертається навколо осі  $z$ . В склад установки входять повітродувка 4, клапани 5 та 8 для управління роботою ДЕУ, вхідний 6 і вихідний 7 трубопроводи з досліджуваним приладом 9.

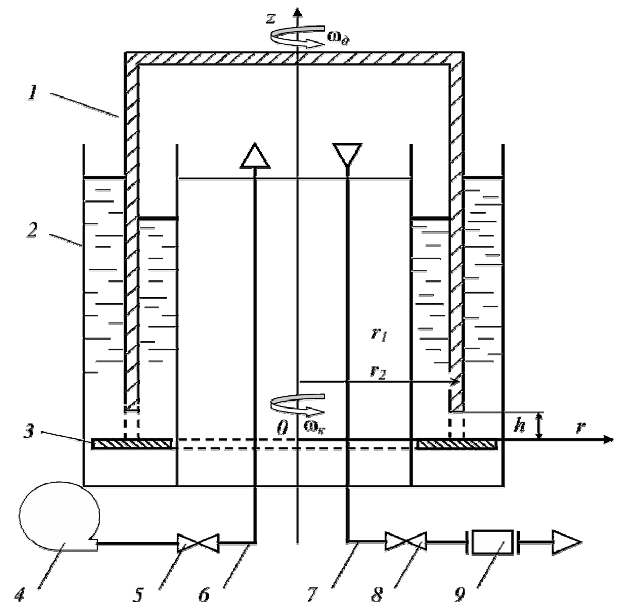


Рисунок 1 – Схема ДЕУ з обертючим дзвоном і стабілізуючим кільцем

При дослідженні будемо вивчати рух рідини на ділянці між обертючим дзвоном і обертючим стабілізуючим кільцем для випадку їх зближення. При розв'язанні цієї задачі будемо вважати, що з-під стінок дзвона витісняється кільце рідини, яке показано на рис. 1 пунктирними лініями. За цих умов радіальна течія рідини буде перевищувати осьову течію, оскільки швидкість переміщення рідини вздовж осі  $r$  буде набагато більшою по відношенню до швидкості рідини вздовж осі  $z$ , а градієнт радіальної складової швидкості  $V_r$  вздовж осі  $z$  буде переважати над градієнтом цієї ж складової вздовж осі  $r$  [10]. При цьому буде мати місце

незначна різниця колових швидкостей рідини на внутрішньому і зовнішньому радіусах торцьової поверхні дзвона внаслідок його тонкостінності, а також суттєво більша різниця колових швидкостей на торці дзвона і обертовому стабілізуючому кільці за умови суттєвої різниці кутових швидкостей дзвона та стабілізуючого кільця.

Наведені вище обґрунтування відносно градієнтів складових швидкостей  $V_r$  та  $V_\varphi$  дають можливість прийняти наступні припущення для розв'язку математичної моделі:

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} \ll \frac{\partial V_r}{\partial z}, \quad \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} \ll \frac{\partial V_\varphi}{\partial z} \quad \text{при } \omega_\delta \ll \omega_\kappa, \quad (1)$$

де  $V_r$  і  $V_\varphi$  – радіальна і колова складові швидкості рідини,  $\omega_\delta$  і  $\omega_\kappa$  – кутові швидкості обертання дзвона і кільця відповідно.

Поряд з цим будемо вважати, що швидкість осевого переміщення дзвона є значно меншою від колової швидкості його стінки, а течія рідини установлена, асиметрична і ламінарна. За цих умов рівняння Нав'є-Стокса і нерозривності струменя [10] між торцевою поверхнею дзвона 1 і стабілізуючим кільцем 3 (рис.1) набудуть вигляду:

$$v \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} - \frac{V_\varphi^2}{r}, \quad (2)$$

$$v \left( -\frac{V_\varphi}{r^2} + \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial z^2} \right) = V_z \frac{\partial V_\varphi}{\partial z}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rV_r)}{\partial r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0, \quad (5)$$

де  $V_z$  – складова швидкості рідини вздовж осі  $z$ ;  $\frac{\partial p}{\partial r}$  і  $\frac{\partial p}{\partial z}$  – градієнти тиску вздовж осей  $r$  та  $z$ ;  $v$ ,  $\rho$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості і густина рідини відповідно.

Граничні умови для поставленої задачі досліджень будуть мати наступний вигляд:

$$\text{для } z=0: V_r=0, \quad V_z=0, \quad V_\varphi=\omega_\kappa r_0; \quad (6)$$

$$\text{для } z=h: V_r=0, \quad V_z=-u, \quad V_\varphi=\omega_\delta r; \quad (7)$$

$$\text{при } r=r_1 \text{ і } r=r_2: p=0, \quad (8)$$

де  $u$  – швидкість осевого переміщення дзвона;

$h$  – відстань між торцем дзвона і стабілізуючим кільцем;  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_0$  – внутрішній, зовнішній та середній радіуси дзвона відповідно;  $p$  – значення тиску на торці дзвону.

Зауважимо, що в умові (8) виштовхувальною силою Архімеда нехтуємо, оскільки для підвищення точності в ДЕУ вона компенсується спеціальними пристроями [1].

З врахуванням того, що товщина стінки дзвона порівняно з його діаметром є величиною неспіврозмірною, то з достатньою для практики точністю можна замість змінної  $r$  у рівнянні (3) прийняти її фіксоване значення, яке дорівнює середньому радіусу дзвона  $r_0$ .

Для розв'язку рівняння (3) скористаємося методом лінеаризації. Відповідно до умови можливості його застосування складову швидкості  $V_z$  необхідно зафіксувати і прийняти рівною її середньому значенню  $V_{z0}$  при зміні  $z$  від 0 до  $h$ . Фіксація змінних  $r$  та  $V_z$  дозволяє розв'язати рівняння (3) як звичайне диференціальне відносно  $V_\varphi$  з постійними коефіцієнтами  $r_0$  і  $V_{z0}$ . Таким чином його розв'язок набуває вигляду:

$$V_\varphi = (\omega_\delta r - \omega_\kappa r_0) \frac{e^{kz}}{e^{kh}} + \omega_\kappa r_0, \quad (9)$$

де  $k = V_{z0}/v$  – корінь характеристичного рівняння для розв'язку (3).

Підставляючи (9) у рівняння (2) і інтегруючи останнє по  $z$  методом розділення змінних за граничних умов (6) та (7), отримуємо вираз для визначення радіальної складової швидкості рідини:

$$V_r = \frac{1}{2\rho v} \frac{\partial p}{\partial r} (z^2 - hz) - \frac{B}{4k^2} \left( -e^{2kz} + \frac{z}{h} e^{2kh} - \frac{z}{h} + 1 \right) - \frac{D}{k^2} \left( e^{kz} - \frac{z}{h} e^{kh} + \frac{z}{h} - 1 \right) - \frac{G}{2} (z^2 - hz), \quad (10)$$

$$\text{де } B = \frac{(\omega_\delta r - \omega_\kappa r_0)^2}{v r e^{2kh}}, \quad D = \frac{2\omega_\kappa r_0 (\omega_\delta r - \omega_\kappa r_0)}{v r e^{kh}},$$

$$G = \frac{\omega_\kappa^2 r_0^2}{v r}.$$

Після виведення з (10) алгебраїчного виразу для градієнту  $\frac{\partial p}{\partial r}$  і наступного його інтегрування за умови нехтування складовими вищого порядку меншості отримаємо таку

залежність розподілу тиску на торцьовій поверхні обертового дзвона:

$$p = \frac{3\rho v}{h^2} \cdot \left( \frac{u}{h} - \frac{v\omega_0^2}{4V_{z0}^2} \right) \cdot \left[ -r^2 + r_1^2 + \frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln(r_2/r_1)} \ln(r/r_1) \right] - \frac{3\rho v}{h^2} \cdot \frac{3vr_0\omega_0\omega_K}{V_{z0}^2} \cdot \left[ -r + r_1 + \frac{r_2 - r_1}{\ln(r_2/r_1)} \ln(r/r_1) \right]. \quad (11)$$

У відповідності до умови застосованого методу лінеаризації для розв'язку системи рівнянь (2)-(5) встановимо зв'язок між дійсним значенням  $V_z$  і прийнятим середнім значенням  $V_{z0}$ . З цією метою проінтегруємо по  $z$  вираз  $\frac{\partial V_z}{\partial z}$  із рівняння (5) з урахуванням умов (6) та (7). При цьому скористаємося також формулами (10) та (11) для виразів  $\frac{\partial V_r}{\partial r}$  і  $\frac{V_r}{r}$ . Після наступного інтегрування відносно  $z$  отриманого виразу для  $V_z$  в межах від 0 до  $h$  і ділення кінцевого виразу на  $h$ , а також розв'язку кубічного рівняння отримаємо:

$$V_{z0} = -\frac{u}{3} \cdot \left\{ \cos \left[ \frac{\arccos \left( 1 - N - 3N \frac{\omega_K r_0}{\omega_0 r} \right)}{3} \right] + \frac{1}{2} \right\}, \quad (12)$$

де  $N = \frac{27vh\omega_0}{2u^3}$  – безрозмірний коефіцієнт.

Наведений розв'язок (12) є можливий до застосування за такої умови, яка витікає із вигляду його математичного подання:

$$0 \leq N + 3N \frac{\omega_K r_0}{\omega_0 r} \leq 2. \quad (13)$$

Для визначення сили лобового опору  $F$  переміщенню обертового дзвона проінтегруємо за двома змінними  $r$  та  $\varphi$  вираз (11) спільно з (12). Після виконання відповідних алгебраїчних перетворень отримаємо:

$$F = \frac{3\pi\mu u}{h^3} \cdot \left[ \left( 1 - \frac{N}{G[f(N, \omega)]^2} \right) f_1(r) - 2Nr_0 \frac{\omega_K}{\omega_0} \frac{f_2(r)}{[f(N, \omega)]^2} \right], \quad (14)$$

де

$$f(N, \omega) = - \left\{ \cos \left[ \frac{\arccos \left( 1 - N - 3N \frac{\omega_K}{\omega_0} \right)}{3} \right] + \frac{1}{2} \right\},$$

$$f_1(r) = \left( \frac{r_2^2 - r_1^2}{2} \right) \cdot \left[ r_2^2 + r_1^2 - \frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln(r_2/r_1)} \right],$$

$$f_2(r) = (r_2 - r_1) \cdot \left[ \frac{r_2^2 + r_2 r_1 + r_1^2}{3} - \frac{r_2^2 - r_1^2}{2 \ln(r_2/r_1)} \right].$$

У (14) використані наступні додаткові позначення:  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості замкової рідини;  $f(N, \omega)$  – функція коефіцієнта  $N$  і кутових швидкостей  $\omega_0, \omega_K$ ;  $f_1(r), f_2(r)$  – функції геометричних розмірів дзвона.

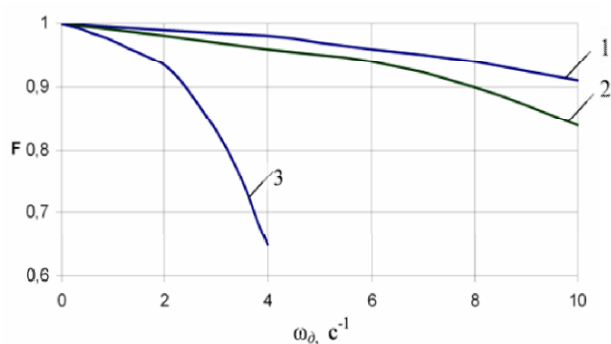
Із аналізу отриманої формули (14) витікає, що надання обертового руху дзвону і стабілізуючому кільцю у витіснювачі приводить до зменшення сили лобового опору переміщення дзвона. Звідси також слідує, що при одночасному обертанні дзвона і стабілізуючого кільця для зменшення лобового опору напрями їх обертання повинні співпадати, так як в граничних умовах (6) та (7) складові швидкостей  $V_\varphi$  мають однакові знаки.

На рис. 2 наведені результати чисельного моделювання отриманого виразу (14), які подані у вигляді кривих зміни безрозмірного лобового опору  $F'$  як функції від кутової швидкості обертання дзвона  $\omega_0$  для різних кутових швидкостей  $\omega_K$  обертання стабілізуючого кільця. За базову величину для переведення лобового опору  $F$  у безрозмірну величину прийнятий опір  $F_0$  переміщенню аналогічного не обертового дзвона при фіксованих значеннях змінних  $v, h, u, r_1, r_2$ . Із отриманих результатів (рис. 2) витікає, що при наданні обертання стабілізуючому кільцю ефект зменшення лобового опору може досягати 33,3% і є значно більшим, ніж при його відсутності.

## ВИСНОВКИ

Застосування отриманої залежності для визначення сил лобового опору при наближенні обертового дзвона до стабілізуючого кільця дозволяє проектувати і аналітично досліджувати ДЕУ, на базі якої можна створювати робочі еталони дзвонного типу. За рахунок наявності

у кільцевому резервуарі обертового стабілізуючого кільцем досягається краща стабілізація тиску під дзвоном та на досліджуваному приладі внаслідок зменшення зростання гідродинамічних сил і лобового опору переміщенню дзвона. Завдяки цьому покращується стабільність відтворених еталонів витрат газу і, як наслідок, досягається підвищення точності відтворення і вимірювання ДЕУ витрат і контрольних об'ємів газу.



1 –  $\omega_k = 0$ ; 2 –  $\omega_k = 0,2\omega_0$ ; 3 –  $\omega_k = 5\omega_0$

**Рисунок 2 – Залежності зміни лобового опору  $F'$  від кутових швидкостей дзвона**

1 Державний спеціальний еталон одиниці 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 John D.Wright. What is the “Best” Transfer Standard for Gas Flow? / John D.Wright // [www.cstl.nist.gov](http://www.cstl.nist.gov). 3 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу: ДСТУ 3383: 2007.– [Чинний від 2007-07-01; на

заміну ДСТУ 3383-96].– К.: Держспоживстандарт України, 2007. – III, 9 с. – (Національний стандарт України). 4 Пат. 59281 А Україна, МПК 7 G01F25/00. Дзвонова витратомірна установка / Панфілов Г.С., Ляшенко Л.І., Шелудченко В.І. - № 20021210480; заявл.24.12.02; опубл.15.08.03, Бюл. №8. 5 Пат. 61025 А Україна, МПК 7 G01F25/00. Дзвонова витратомірна установка / Панфілов Г.С., Ляшенко Л.І., Шелудченко В.І. – № 20021210693; заявл. 27.12.02; опубл. 15.10.03, Бюл. №10. 6 А. с. 609972 (СССР), МКИ G 01 F 25/00. Устройство для градуировки и поверки счетчиков и расходомеров газа / Бродин И.С. Еремин Ю.Я. Середюк О.Е. [и др.]. - №2333727/18-10; заявл. 15.03.76; опубл. 05.06.78, Бюл. № 21. 7 А. с. 771470 (СССР), МКИ G 01 F 25/00. Колокольная дискретно – динамическая установка для точного воспроизведения и измерения расхода газа / Бродин И.С., Чеховский С.А., Середюк О.Е. - №2670608/18-10; заявл. 04.10.78; опубл. 15.10.80, Бюл. №38. 8 Пат. 46253 А Україна, МПК 7 G01F25/00. Рабочий эталон об'єму газу дзвонового типу / Воцинський В.С., Воцинський В.В., Іроденко В.В. [та ін.]. - №2001053018; заявл.03.05.01; опубл.15.05.02, Бюл. №5. 9 Пат. 35076 А Україна, МПК 7 G01F25/00. Рабочий эталон об'єму і витрати газу дзвонового типу / Середюк О.Є., Середюк Д.О. - № 200805528; заявл.29.04.08; опубл.26.08.08, Бюл. №16. 10 Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г.Лойцянский Л.Г.- М.: Наука, 1978.- 736 с.

**Поступила в редакцію 27.05.2010 р.**

**Рекомендував до друку докт. техн. наук, проф. Костишин В.С.**