

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОХИБКИ ВІД НЕПОСТІЙНОСТІ ТИСКУ В ДЗВОНОВИХ ВИТРАТОВИМІРЮВАЛЬНИХ УСТАНОВКАХ

© Середюк О.Є., 1998

Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу

Виходячи з викладеного алгоритму роботи дзвонових витрато-вимірювальних установок здійснене математичне моделювання однієї з компонент їх сумарної похибки — похибки від нестійності тиску під дзвоном. Отримані аналітичні вирази для розрахунку цієї складової похибки і виконане порівняння з аналогічними відомими формулами. З використанням прикладів експериментально отриманих осцилограм тиску вказані переваги виведених залежностей і конкретизовані умови доцільності їх застосування.

Одним із важливих етапів при створенні і впровадженні взірцевих дзвонових витрато-вимірювальних установок (ДВУ) є їх метрологічні дослідження і атестація. Однак внаслідок високої точності і стаціонарного виготовлення таких установок, а також відсутності відповідних еталонних мобільних витрато-вимірювальних засобів прямий метод визначення їх метрологічних характеристик практично неможливий. Тому для них здійснюють експериментальне або аналітичне визначення кожної складової сумарної похибки з подальшим розрахунком границі допустимого її значення [3].

До числа суттєво впливових складових, які підлягають обов'язковій оцінці у взірцевих установках, належить похибка від нестійності тиску під дзвоном [1, 6, 7]. Алгоритм оцінки цієї похибки у всіх вказаних роботах зводиться до порівняння контрольного об'єму газу  $V_K$ , відрахованого за допомогою відлікового пристрою установки, з фактично витісненим (дійсним) об'ємом газу  $V_A$ , який передається до досліджуваного приладу. Аналітично це записується формулою

$$\delta_p = \frac{V_A - V_K}{V_K} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де  $\delta_p$  — відносна похибка від зміни тиску під дзвоном.

Розрахунок значення об'єму  $V_A$  ґрунтується на застосуванні основного рівняння стану газу. Водночас алгоритми його обчислення можуть відрізнитися між собою внаслідок можливих різноманітних підходів до вибору граничних умов і суті фізичних процесів під дзвоном установки. Це,

своєю чергою, може призвести до різних розраховуваних значень похибки, які експериментально перевірити неможливо. Тому доцільним є математичне моделювання і аналіз цієї похибки, виходячи з фізичних основ функціонування ДВУ.

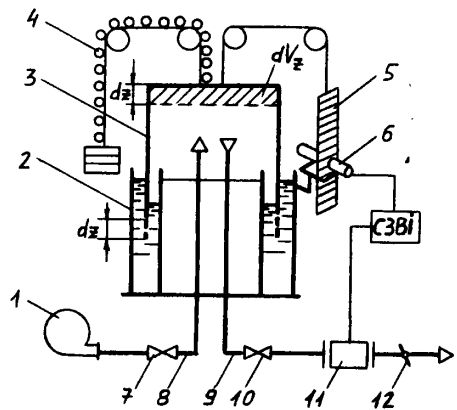


Рис. 1. Функціональна схема ДВУ.

ДВУ (рис.1) складається з повітродувки 1, дзвона 3, який занурений у кільцевий резервуар з рідиною (витіснювач) 2, підвідного 8 і відвідного 9 трубопроводів з вмонтованими в них швидкодіючими запірними клапанами 7 і 10 і компенсаційної стрічки 4. Установка містить систему збору вимірювальної інформації (СЗВІ) з відлікового пристрою установки і з досліджуваного приладу 11. Конструктивно відліковий пристрій механічно пов'язаний з дзвоном 3 і може бути виготовлений, наприклад, у вигляді контрольної лінійки 5 з щільними отворами, яка рухається відносно оптоелектронної пари 6. У відвідному трубопроводі 9 знаходиться пристрій 12 задавання

відтворюваних значень витрати газу і досліджуваній лічильник чи витратомір 11.

Під час роботи установки спочатку здійснюється наповнення дзвона від повітродувки 1 при закритому клапані 10. Після досягнення дзвоном заданого значення наповнення за командою системи автоматичного керування (на рис.1 не зображена) або з використанням ручного керування закривається клапан 7, вимикається повітродувка 1 і дзвін 3 за рахунок стиснення своєю вагою повітря в піддзвонному просторі набуває зваженого стану. Далі, з витримкою часу або без неї (залежно від заданого алгоритму роботи установки), відкривається клапан 10, що призводить до опускання дзвона під власною вагою і витіснення об'єму повітря з-під нього через досліджуваній прилад 11. Створювана при цьому витрата у відповідному трубопроводі 9 визначається положенням дроселюючого елемента пристрою 12, а відтворюваний контрольний об'єм газу відлічується системою СЗВІ і порівнюється цією ж системою з об'ємом газу, одночасно виміряним приладом 11. У разі дослідження витратомірів газу системою СЗВІ здійснюється розрахунок відтворюваної витрати повітря, наприклад, усередненням контрольного об'єму протягом часу його відтворення, і її порівняння з сигналом досліджуваного витратоміра 11.

Аналіз викладеного алгоритму роботи установки і її конструктивних особливостей свідчить, що згідно з основним рівнянням стану газу будь-яка зміна тиску повітря під дзвоном спричинить зміну об'єму газу під ним. Водночас математичне моделювання таких установок [2, 8] і їх експериментальні дослідження [7] обґрунтовують і підтверджують наявність непостійності тиску під дзвоном при роботі установки. Тому здійснимо моделювання взаємозв'язку між тиском повітря під дзвоном і відтворюваним установкою його об'ємом.

Як вихідне рівняння застосуємо диференціальну форму запису об'єму газу, що поданий до досліджуваного приладу

$$dV_A = dV_z + dV_p, \quad (2)$$

де  $dV_A$  — дійсний елементарний об'єм газу, який передається до досліджуваного приладу;  $dV_z$  — елементарний об'єм газу, що витісняється дзвоном;  $dV_p$  — зміна витіснюваного об'єму газу внаслідок його приросту або зменшення від зміни тиску під дзвоном.

Об'єм газу, що витісняється дзвоном, визначається його геометричними розмірами і вертикальним переміщенням

$$V_z = S \cdot z, \quad (3)$$

де  $S$  — площа внутрішнього поперечного перерізу дзвона;  $z$  — вертикальне переміщення дзвона, яке відповідає витісненому об'єму газу  $V_z$ . Використовуючи (3), отримуємо вираз для значення елементарного об'єму  $dV_z$ , вказаного на рис.1

$$dV_z = S \cdot dz. \quad (4)$$

Зміна об'єму газу  $dV_p$ , від непостійності тиску для випадку ізотермічного процесу може бути одержана з диференціальної форми подання рівняння стану газу

$$VdP + PdV_p = 0, \quad (5)$$

яка дає можливість записати

$$dV_p = -\frac{V}{P}dP, \quad (6)$$

де  $V$  і  $P$  — відповідно об'єм і абсолютний тиск газу під дзвоном;  $dP$  — приріст тиску  $P$ .

Під час роботи установки витіснюваний об'єм газу пропорційний до переміщення дзвона  $z$ , а тиск  $P$  залежить як від переміщення дзвона, так і від швидкості його опускання  $u$  [2]. Тому вираз (6) подамо в узагальненому вигляді

$$dV_p = -\frac{V(z)}{P(z,u)}dP. \quad (7)$$

Врахувавши (3), (4) і (7), приходимо до такого запису виразу (2):

$$dV_A = Sdz - \frac{S \cdot z}{P(z,u)}dP. \quad (8)$$

Як слідує з (8), об'єм газу  $V_A$  визначається інтегруванням цього рівняння по  $z$ , для чого необхідно мати вираз для  $P(z,u)$ , який можна отримати апроксимацією експериментально одержаної залежності при робочих умовах установки. При цьому кінцевий вигляд рівняння (8) визначатиметься видом апроксимаційного рівняння. Так, наприклад, апроксимація тиску лінійною залежністю

$$P(z,u) = P_0 + A_1(u) \cdot z \quad (9)$$

і її диференціювання по  $z$  призводить до виразу

$$\frac{dP(z,u)}{dz} = A_1(u), \quad (10)$$

де  $P_0$  — абсолютний тиск під дзвоном на початку витіснення контрольного об'єму газу;  $A_1(u)$  — коефіцієнт пропорційності лінійної апроксимаційної залежності.

Після перетворення (8) з урахуванням (9) і (10), а також після прийняття умови знехтувально малої

зміни тиску  $\Delta P = A_1(u)z$  під дзвоном порівняно з його абсолютним значенням  $P_0$ , отримуємо

$$dV_A = Sdz - \frac{A_1(u) \cdot S}{P_0} \cdot z dz. \quad (11)$$

Проінтегрувавши (11) по  $z$  у межах від 0 до  $H_K$ , що відповідає переміщенню дзвона при витісненні ним контрольного об'єму  $V_K$ , одержимо вираз

$$V_A = V_K \left( 1 - \frac{A_1(u) \cdot H_K}{2P_0} \right) \quad (12)$$

При цьому лінійність апроксимаційної залежності (9) і постійність швидкості  $u$  опускання дзвона при фіксованій відтворюваній витраті газу дає можливість визначити коефіцієнт  $A_1(u)$  з формули

$$A_1(u) = \frac{\Delta P}{H_K} \quad (13)$$

і подати такий кінцевий вираз для обчислення дійсного об'єму газу, який витісняється дзвоном установки

$$V_A = V_K \left( 1 - \frac{\Delta P}{2P_0} \right) \quad (14)$$

де  $\Delta P$  — різниця тисків під дзвоном наприкінці і на початку відтворення установкою контрольного об'єму газу  $V_K$ . Тут вкажемо, що кожній швидкості опускання дзвона  $u$  відповідає конкретне значення коефіцієнта  $A_1(u)$ , яке визначається як геометричними розмірами дзвона, витіснювача, в'язкістю заповнюючої рідини витіснювача, так і режимом роботи установки, наприклад, вмиканням обертання дзвона [7, 8].

У разі апроксимації тиску під дзвоном кривою другого порядку вигляду

$$P(z, u) = P_0 + A_2(u)z^2, \quad (15)$$

після виконання аналогічних перетворень отримаємо

$$V_A = V_K \left( 1 - \frac{2\Delta P}{3P_0} \right). \quad (16)$$

У виразі (15)  $A_2(u)$  — апроксимаційний коефіцієнт кривої другого порядку, який визначаємо за формулою

$$A_2(u) = \frac{\Delta P}{H_K^2}. \quad (17)$$

Застосування алгоритму (1) стосовно виразів (14) і (16) зумовлює таке подання кінцевих формул для обчислення похибки від непостійності тиску:

$$\delta_{PA} = -\frac{\Delta P}{2P_0} \cdot 100\%, \quad (18)$$

$$\delta_{PP} = -\frac{2\Delta P}{3P_0} \cdot 100\%, \quad (19)$$

де  $\delta_{PA}$  і  $\delta_{PP}$  — відносні похибки від непостійності тиску під дзвоном при їх відповідно лінійній і параболічній апроксимаціях.

Застосування вищенаведеної методики дає можливість розраховувати дійсне значення витісненого об'єму газу при апроксимації залежності  $P(z, u)$  поліномами вищих порядків або іншими видами нелінійних залежностей, наприклад, логарифмічною чи експоненціальною. При цьому конкретизацію апроксимованої кривої  $P(z, u)$  потрібно визначати за результатами експериментальних досліджень установки на різних режимах роботи.

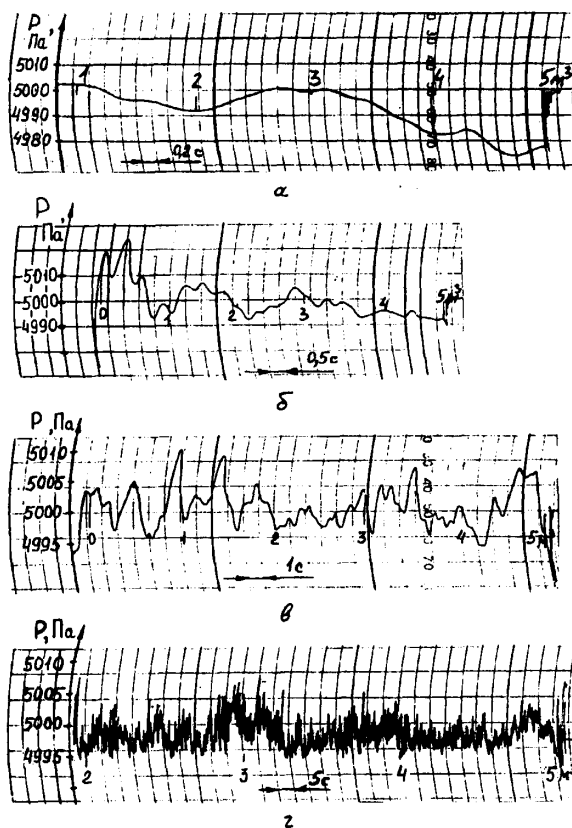


Рис.2. Осцилограми тиску під дзвоном витратовимірною установкою РКДУ-0,44 на витратах 2500 (а), 1600 (б), 600 (в), 70 (г) м<sup>3</sup>/год.

Практичну цінність виведених виразів (18) і (19) проілюструємо за допомогою осцилограм тиску (рис.2), отриманих при експериментальних дослідженнях дзвонової установки РКДУ-0.44 [4],

яка експлуатується на ВАТ "Промприлад" (м. Івано-Франківськ).

Насамперед вкажемо, що у всіх ДВУ обов'язково конструктивно усувається найсуттєвіший чинник нестабільності тиску — зменшення ваги дзвона внаслідок дії виштовхувальної сили на занурювану частину стінок дзвона. На рис.1 зображене виконання такого пристрою у вигляді компенсаційної стрічки 4.

Аналіз кривих (рис.2) свідчить про наявність у них детермінованої і випадкової складових. Перша очевидна внаслідок результуючого зменшення тиску при переміщенні дзвона від початкового до кінцевого положень, тобто при витісненні ним  $5 \text{ м}^3$  повітря. Вона пояснюється дією сил гідравлічного опору на швидкість переміщення дзвона і глибини його занурення в рідину витіснювача. Її вплив зростає зі збільшенням відтворюваних витрат. До детермінованої складової також належать періодичні загасаючі коливання тиску на початкових значеннях відтворюваного об'єму повітря, що має місце під час перехідного процесу при розгоні дзвона до усталеної швидкості руху.

Про наявність випадкової складової коливань тиску свідчать високочастотні флуктуації зміни тиску протягом всього періоду витіснення дзвоном об'єму повітря. Вони зумовлені дією випадкових чинників, наприклад, локальними змінами механічних сил тертя під час руху направляючих стабілізації вертикального положення дзвона, неідеальністю площі його поперечного перерізу вздовж висоти, вібрацією дзвона та інших вузлів установки. З наведених осцилограм також видно, що із збільшенням відтворюваних витрат спектр, у цілому, зміщується в бік нижчих частот. Це пояснюється зростаючим впливом інерційних сил маси дзвона і жорстко з'єднаних з ним рухомих направляючих, що сприяє згладжуванню високочастотних флуктуацій.

Отже, враховуючи можливість отримання різноманітних видів осцилограм тиску, що можуть мати місце при експлуатації дзвонів установок, а також подання в наукових публікаціях [1, 6] виразів, аналогічних до отриманих (18) і (19), здійснимо їх порівняльний аналіз з метою визначення умов доцільності застосування кожного з них.

У роботі [1] подана така узагальнена формула обчислення похибки  $\delta_p$  від непостійності тиску у витратовимірвальних установках:

$$\delta_p = - \left( \frac{V_3}{V_K} \ln \frac{P_0}{P_0 + \Delta P} + \frac{P_0}{\Delta P} \ln \frac{P_0}{P_0 + \Delta P} + 1 \right) \cdot 100\%, \quad (20)$$

де  $V_3$  — загальний об'єм газу, що міститься у витратовимірвальній установці;  $V_K$  — контрольний об'єм газу;  $P_0$  і  $\Delta P$  — відповідно значення абсолютного тиску газу в установці та його приріст за час відтворення контрольного об'єму.

Водночас в [6] для оцінювання досліджуваної похибки  $\delta_p$  застосовували такий алгоритм

$$\delta_p = - \frac{P_0}{(P_0 + \Delta P)^2} \cdot \Delta P \cdot 100\%. \quad (21)$$

Порівняння отриманих виразів (18) і (19) з відомими (20) і (21) засвідчує, що всі вони передбачають використання як інформативних параметрів значення тиску  $P_0$  на початку та його приріст  $\Delta P$  за час відтворення контрольного об'єму газу. Водночас, з аналізу поданих на рис.2 кривих очевидно є наявність похибки від нестабільності тиску, навіть, за умови випадкової збіжності його значень на початку та в кінці відтворення. Обчислення цієї похибки згідно з алгоритмами (20) і (21) зумовлює отримання її нульового значення, у той час як у формулах (18) і (19) вираз  $\Delta P$  означає не вимірне значення зміни тиску, а його обчислене апроксимоване значення за час відтворення контрольного об'єму.

Другою неточністю відомих алгоритмів (20) і (21) є неврахування ними фактичного закону зміни тиску протягом відтворення контрольного об'єму газу. Про актуальність врахування цього чинника свідчить те, що результати обчислень згідно з (18) і (19) відрізняються між собою на 33%, виходячи з апроксимації лінійною чи параболічною залежностями. Вкажемо, що жоден з двох відомих алгоритмів обчислення  $\delta_p$  не дає можливості розраховувати похибку від локальних змін тиску. Як видно з рис.2 такі зміни характеризуються випадковими додатними та від'ємними приростами стосовно середнього значення чи апроксимованої залежності. Враховуючи високу частоту таких флуктуацій, очевидно є в більшості практичних випадків взаємна компенсація приростів і зменшень контрольного об'єму, що обґрунтовує можливість нехтування цією складовою похибки. Водночас, застосування методу сплайнової апроксимації [5] в сукупності з виразом (8) і запропонованою в цій статті методикою відкриває можливість до знаходження інтегрованого значення приросту тиску для будь-якої частки відтворюваного контрольного об'єму газу, а, значить, і похибки  $\delta_p$  від локальних змін тиску.

Особливістю формули (20) і незаперечною її цінністю є наявність складової  $\frac{V_3}{V_K} \ln \frac{P_0}{P_0 + \Delta P}$ , яка враховує вплив на досліджувану похибку  $\delta_p$  значення відтворюваного контрольного об'єму відносно загального об'єму газу в установці. Однак враховуючи, що в реальних ДВУ, навіть при неповному витісненні контрольного об'єму значення  $V_3$  не може перевищувати більше ніж на порядок значення  $V_K$ , а зміна тиску під дзвоном у більшості випадків не перевищує 20 Па, то при надлишковому тискові 5 кПа [4] співвідношення  $\frac{P_0}{\Delta P}$  буде близьким до  $5 \cdot 10^3$ . Тому першим доданком у (20) для ДВУ в переважній більшості випадків з достатньою для практики точністю можна знехтувати.

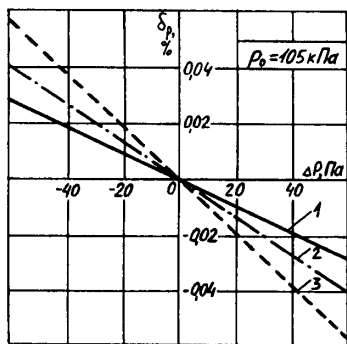


Рис.3. Результати чисельного аналізу алгоритмів розрахунку похибки  $\delta_p$  від непостійності тиску  $\Delta P$  при початковому тискові  $P_0 = 105$  кПа:

- 1 - графічна інтерпретація алгоритмів (18) і (20);
- 2, 3 - графічна інтерпретація алгоритмів відповідно (19) і (21).

Чисельний аналіз отриманих і відомих алгоритмів розрахунку похибки від непостійності тиску  $\delta_p$  поданий на рис.3. З нього випливає, що максимального значення при однакових приростах тиску похибка набуває у разі розрахунку за алгоритмом (21). Його застосування зумовлює отримання найбільш можливих значень похибки без конкретизації тривалості такого відхилення і моменту його наявності. Цей алгоритм доцільний насамперед при розрахунку похибки на режимах роботи ДВУ, які зображені на рис.2, г. Однак, якщо врахувати при цьому відсутність детермінованої складової зміни тиску, то параметром  $\Delta P$  необхідно вибирати максимальне відхилення тиску під дзвоном від середнього значення  $P_0$ . Реально це означає, що похибка  $\delta_p$  буде розрахована для

половинного значення  $\Delta P$ , що спричинить, як видно з графіків на рис.3, практичну збіжність з результатами, зображеними прямою 1.

Розходження результатів обчислення похибки за алгоритмами (18) і (20) не перевищує одного проценту (пряма 1) і кожен з них можна рекомендувати до розрахунку похибки при наявності детермінованої складової зміни тиску протягом досліджуваного періоду вимірювального циклу, що відображають криві а-в на рис.2. Водночас виразу (18) характерна простіша форма математичного опису. Формула (19) доцільна для застосування при наявності детермінованої нелінійної форми зміни тиску під дзвоном, прикладом якої є крива а на рис.2. Розглянута математична модель і, зокрема, запропонований алгоритм (8) у сукупності із скуппульозними метрологічними дослідженнями і застосуванням апроксимаційних залежностей дає можливість точніше оцінити похибку ДВУ від непостійності тиску під дзвоном практично при будь-яких закономірностях його зміни. Прикладом конкретної кінцевої форми подання виразу (8) є формули (18) і (19) для обчислення похибки  $\delta_p$  у випадках лінійної та параболічної апроксимації кривої тиску. Практично це відкриває ще одну з можливостей уточнення метрологічних характеристик візрівцевих витратимірювальних установок.

1. Бродин И.С. Теория, принципы построения и внедрение испытательных расходоизмерительных комплексов для технического и метрологического обеспечения измерений расхода газа: Автореф. дисс. ... д-р техн. наук. Санкт-Петербург. 1992. 2. Бродин И.С., Чеховский С.А., Иващенко В.В. Исследование колокольного мерника в качестве источника стабильного расхода // Измерительная техника. 1976. № 5. С.29—31. 3. ГОСТ 8.381-80. Эталоны. Способы выражения погрешностей. 4. Колокольная расходоизмерительная установка / И.С. Бродин, О.Е. Середюк // Проспект МВССО УССР. Ивано-Франковский институт нефти и газа. К., 1989. 5. Обработка сигналов: Підручник /В.П. Бабак, В.С. Хандецький, Е. Шрюфер. К., 1996. 6. 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. 7. Середюк О.Е. Испытательная расходоизмерительная установка со стабилизацией давления под колоколом: Автореф. дисс. канд. техн. наук. Каунас, 1990. 8. Середюк О.С. Математичне моделювання якісно-інформативних процесів дзвонових витратимірювальних установок // Методи та прилади контролю якості. 1997. № 1. С.29-34.