

– 701 с. 4. ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2007 Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 5. Методика виконання вимірювань. – К.: Держспоживстандарт України. 5. Пистун Є.П., Лесовой Л.В., Матіко Ф.Д., Марковський Д.І., Лесовой Р.Л. Комп'ютерна програма САПР “Расход-РУ”: Посібник користувача. – Львів: Вид-во ЗАТ “Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв”, 2007. – 127 с. 6. Пистун Е.П. О погрешностях определения среднесуточного значения расхода газа, измеряемого методом переменного перепада давления / Е.П. Пистун // Республиканский межведомственный научно-технический сборник. Контрольно-измерительная техника. – Львов: Вища школа, 1985. – Вып.37. – С.11–14.

УДК 681.121.84

Л.В. Лесовой

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів

РОЗРАХУНОК ВИТРАТИ СУХОЇ ЧАСТИНИ ВОЛОГОГО ГАЗУ ЗА МЕТОДОМ ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ

© Лесовой Л.В., 2011

Розроблені основні засади вимірювання витрати сухої частини вологого газу, нові математичні моделі розрахунку перепаду тиску на пристрої звуження потоку, коефіцієнта розширення сухої частини вологого газу та рівняння для розрахунку витрати сухої частини вологого газу.

The paper developed the basic principles of flowrate measurement of dry part of humid gas, developed new mathematical models for calculating differential pressure in the primary device, the equation for the expansibility factor of the dry part of humid gas, the equation for calculating the flowrate of dry part of humid gas.

Постановка проблеми

Економія паливно-енергетичних ресурсів, до яких належить природний газ, вологий нафтовий газ, коксовий газ тощо, неможлива без правильного розрахунку їх витрати та кількості. Під час вимірювання витрати та кількості плинних енергоносіїв найбільш широко застосовують метод змінного перепаду тиску зі стандартними пристроями звуження потоку. За допомогою цього методу можна вимірювати не тільки витрату і кількість сухого газу, але також витрату і кількість сухої частини вологого газу. У багатьох країнах світу здійснюють оплату не за кількість газу, який проходить у трубопроводі круглого перерізу, а за його енерговміст. Збільшення вологості у газі зменшує його питому теплоту згорання, а отже, і витрату енерговмісту газу. Витрата енерговмісту газу залежить від витрати газу. У багатьох країнах світу виконують розрахунки не за кількість газу, яку отримав споживач, а за його енерговміст. Тому проблема вимірювання витрати та кількості сухої частини вологого газу є актуальною проблемою сьогодення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Рівняння для розрахунку значень витрати сухої частини вологого газу, які застосовувались і застосовуються тепер, наведені у РД50-213–80 [1], у Міждержавному стандарті ГОСТ8.586.5–2005 [2] та у Національному стандарті України ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009 [3].

Але ці рівняння мають деякі недоліки:

– у рівняннях витрати сухої частини вологого газу, наведених у нормативному документі РД50-213–80 [1], у рівняннях, наведених у ГОСТ8.586.5–2005 [2] та у ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009 [3], не врахований вплив вологості газу на зміну перепаду тиску Δp на пристрої звуження потоку, а також під час розрахунку коефіцієнта розширення ϵ газу, що своєю чергою призводить до не точного вимірювання витрати сухої частини вологого газу;

– у рівняннях витрати сухої частини вологого газу, які наведені у [1], значення коефіцієнта стискуваності газу, показника адіабати газу та динамічної в'язкості газу розраховувалися за значенням абсолютного тиску вологого середовища, а не за його парціальним тиском;

– хоча у [2, 3] показник адіабати газу та динамічна в'язкість газу вже визначають за його парціальним тиском, але коефіцієнт стискуваності газу розраховують ще без врахування вологості газу;

– у [2, 3] наведені спрощені формули для розрахунку значень витрати сухої частини вологого газу.

Тому, враховуючи проведений аналіз, необхідно розробити рівняння для розрахунку значень витрати сухої частини вологого газу.

Формулювання цілі статті

Метою роботи є сформулювати основні засади вимірювання витрати та кількості сухої частини вологого газу та отримати рівняння для розрахунку значення витрати сухої частини вологого газу за методом змінного перепаду тиску.

Виклад основного матеріалу

Сухий газ є одним із випадків вологого газу (за нульового значення відносної вологості ϕ газу).

Основна відмінність сухої частини вологого газоподібного середовища від вологого газоподібного середовища полягає у тому, що суха частина газоподібного середовища не містить водяних парів, тобто його парціальний тиск є меншим, ніж тиск вологого газоподібного середовища. І це повинно бути враховано під час виведення рівняння витрати сухої частини вологого газу.

Розглянемо виведення рівняння для визначення масової витрати $q_{m_{сг}}$ сухої частини вологого газу [4].

Щоб вивести рівняння для визначення $q_{m_{сг}}$ застосовують два закони:

– закон збереження енергії, згідно з яким повна енергія E дорівнює нулю, і записують у вигляді

$$E = \sum_{i=1}^n E_i = 0. \quad (1)$$

Повна енергія потоку середовища складається з:

а) потенційної енергії $E_{п}$ тиску сухої частини вологого газу, яку визначають за рівнянням

$$E_{п} = m_{сг} \cdot \frac{\partial p_{сг}}{\rho_{сг}} + m_{сг} \cdot g \cdot \partial y, \quad (2)$$

де $m_{сг}$ – маса сухої частини вологого газу; $\partial p_{сг}$ – зміна абсолютного тиску сухої частини вологого газу; $\rho_{сг}$ – густина сухої частини вологого газу в робочих умовах; g – прискорення земного тяжіння $\left(g = 9,80665 \frac{м}{с^2} \right)$; ∂y – зміна висоти розміщення газопроводу;

б) кінетична енергія $E_{к}$ руху середовища, яку обчислюють за рівнянням

$$E_{к} = m_{сг} \cdot (\phi + \xi) \cdot \frac{\partial \left(\frac{w^2}{2} \right)}{2} + m_{сг} \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \partial x, \quad (3)$$

де ϕ – коефіцієнт Кориоліса; ξ – коефіцієнт гідравлічного опору пристрою звуження потоку; $\frac{\partial(\overline{w}^2)}{\partial x}$ – зміна квадрата середньої швидкості \overline{w} потоку сухої частини вологого газу; λ – коефіцієнт гідравлічного опору; d – діаметр отвору або горловини пристрою звуження потоку при робочій температурі t .

Підставивши рівняння (2) і (3) у (1), після спрощення отримаємо диференційне рівняння, яке описує закон збереження енергії у разі проходження сухої частини вологого газу через пристрій звуження потоку

$$\frac{\partial p_{\text{сг}}}{\rho_{\text{сг}}} + g \cdot dy + (\phi + \xi) \cdot \frac{\partial(\overline{w}^2)}{2} + \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{\overline{w}^2}{2} \cdot dx = 0. \quad (4)$$

– закон збереження маси, згідно з яким за усталеного режиму руху і відсутності розривів суцільності рухомої сухої частини вологого газу його притік $\frac{\partial m_{1\text{сг}}}{\partial \tau}$ за одиницю часу $\partial \tau$ повинен дорівнювати відтоку $\frac{\partial m_{2\text{сг}}}{\partial \tau}$ за той самий час $\partial \tau$, а отже, і частині маси $\frac{\partial m_{\text{сг}}}{\partial \tau}$ сухої частини вологого газу за той самий час $\partial \tau$

$$\frac{\partial m_{1\text{сг}}}{\partial \tau} = \frac{\partial m_{2\text{сг}}}{\partial \tau} = \frac{\partial m_{\text{сг}}}{\partial \tau} = \text{const}. \quad (5)$$

Відношення $\frac{\partial m_{\text{сг}}}{\partial \tau}$ називають масовою витратою $q_{\text{мсг}}$ сухої частини вологого газу.

Записавши притік сухої частини вологого газу $\frac{\partial m_{1\text{сг}}}{\partial \tau}$ за нескінченно малий проміжок часу $\partial \tau$ як

$$\frac{\partial m_{1\text{сг}}}{\partial \tau} = \rho_{1\text{сг}} \cdot \overline{w}_1 \cdot F_1, \quad (6)$$

а його відтік $\frac{\partial m_{2\text{сг}}}{\partial \tau}$ за той самий час $\partial \tau$ у вигляді

$$\frac{\partial m_{2\text{сг}}}{\partial \tau} = \rho_{2\text{сг}} \cdot \overline{w}_2 \cdot F_2, \quad (7)$$

де $\rho_{1\text{сг}}$, \overline{w}_1 , F_1 – відповідно густина сухої частини вологого газу, середня швидкість потоку сухої частини вологого газу і площа поперечного перерізу потоку в одному перерізі; $\rho_{2\text{сг}}$, \overline{w}_2 , F_2 – відповідно густина сухої частини вологого газу, середня швидкість потоку сухої частини вологого газу і площа поперечного перерізу потоку в іншому перерізі, і підставивши їх у рівняння (5), отримаємо рівняння, яке описує закон збереження маси сухої частини вологого газу під час протікання її у закритому газопроводі круглого перерізу

$$q_{\text{мсг}} = \rho_{1\text{сг}} \cdot \overline{w}_1 \cdot F_1 = \rho_{2\text{сг}} \cdot \overline{w}_2 \cdot F_2. \quad (8)$$

Розглянемо потік сухої частини вологого газу через пристрій звуження потоку типу діафрагми, схему якого наведено на рисунку.

Через 1' позначимо переріз трубопроводу до звуження струмینی потоку. У перерізі 1' площею F_1' суха частина вологого газу перебуває під абсолютним тиском $p_{1\text{сг}}'$, а швидкість середовища дорівнює \overline{w}_1' . Після цього перерізу починається звуження струмینی потоку і поступове зростання швидкості потоку.

У перерізі 2' площею F_2' швидкість потоку набуває максимального значення \overline{w}_2' . Це переріз найменшого звуження потоку. Зростання швидкості відбулося за рахунок збільшення кінетичної енергії потоку сухої частини вологого газу внаслідок зменшення потенціальної енергії тиску сухої частини вологого газу від значення $p_{1\text{сг}}'$ до значення $p_{2\text{сг}}'$.

Враховуючи [4], термодинамічний процес перетікання сухої частини вологого газоподібного середовища через звужувальний пристрій належить до адіабатичного і, у зв'язку з цим, описується рівнянням

$$\frac{1}{\rho_{cr}^{\kappa_{cr}}} = const, \quad (9)$$

де p_{cr} – парціальний абсолютний тиск сухої частини вологого газу; ρ_{cr} – густина сухої частини вологого газу, значення якої розраховане за значенням p_{cr} ; κ_{cr} – показник адіабати сухої частини вологого газу, значення якого розраховане за значенням p_{cr} .

Рівняння (4) з врахування (9) запишеться як

$$const \cdot \frac{1}{\rho_{cr}^{\kappa_{cr}}} \cdot \partial p_{cr} + g \cdot \partial y + (\phi + \xi) \cdot \frac{\partial \left(\frac{w^2}{2} \right)}{2} + \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \partial x = 0, \quad (10)$$

яке після інтегрування набуде вигляду

$$\frac{w_2'^2}{2} - \frac{w_1'^2}{2} + g \cdot (h_2' - h_1') + const \cdot \left[\frac{\kappa_{2cr} - 1}{\kappa_{2cr} - 1} \cdot p_{2cr}'^{\kappa_{2cr} - 1} - \frac{\kappa_{1cr} - 1}{\kappa_{1cr} - 1} \cdot p_{1cr}'^{\kappa_{1cr} - 1} \right] + \frac{1}{2} \cdot \int \frac{\lambda \cdot w^2}{d} \cdot \partial x = 0 \quad (11)$$

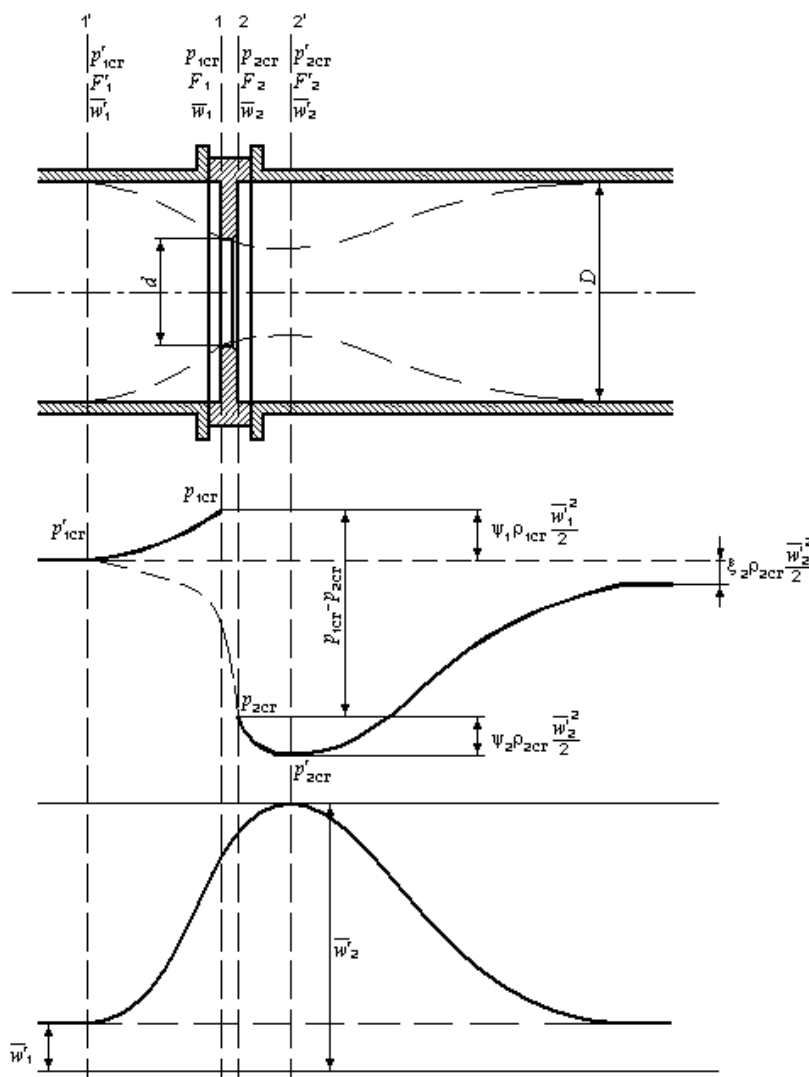


Схема протікання сухої частини вологого газу через діафрагму

Перепишемо рівняння (11) в іншому вигляді

$$\frac{\overline{w_2'}^2}{2} - \frac{\overline{w_1'}^2}{2} + g \cdot (h_2' - h_1') + \text{const} \cdot p_{1\text{сг}}^{-\frac{1}{\kappa_{1\text{сг}}}} \cdot p_{1\text{сг}}' \cdot \left[\frac{\frac{\kappa_{2\text{сг}} - 1}{\kappa_{2\text{сг}}} \cdot \frac{p_{2\text{сг}}'^{\frac{\kappa_{2\text{сг}}}{\kappa_{1\text{сг}} - 1}}}{p_{1\text{сг}}'^{\frac{\kappa_{1\text{сг}}}{\kappa_{1\text{сг}} - 1}}} - \frac{\kappa_{1\text{сг}}}{\kappa_{1\text{сг}} - 1} \right] + \frac{1}{2} \cdot \int \frac{\lambda \cdot \overline{w}^2}{d} \cdot dx = \quad (12)$$

$$= \frac{\overline{w_2'}^2}{2} - \frac{\overline{w_1'}^2}{2} + g \cdot (h_2' - h_1') + \frac{p_{1\text{сг}}}{\rho_{1\text{сг}}} \cdot \left[A_2 \cdot \frac{p_{2\text{сг}}'}{p_{1\text{сг}}' \cdot \tau_0} - A_1 \right] + \frac{1}{2} \cdot \int \frac{\lambda \cdot \overline{w}^2}{d} \cdot dx = 0$$

де τ_0 , A_1 , A_2 – безрозмірні коефіцієнти, значення яких розраховують відповідно за рівняннями:

$$\tau_0 = \frac{1}{\frac{p_{2\text{сг}}'^{\frac{\kappa_{2\text{сг}}}{\kappa_{1\text{сг}} - 1}}}{p_{1\text{сг}}'^{\frac{\kappa_{1\text{сг}}}{\kappa_{1\text{сг}} - 1}}}}; \quad (13)$$

$$A_1 = \frac{\kappa_{1\text{сг}}}{\kappa_{1\text{сг}} - 1}; \quad (14)$$

$$A_2 = \frac{\kappa_{2\text{сг}}}{\kappa_{2\text{сг}} - 1}. \quad (15)$$

Із рівняння нерозривності (8) знайдемо рівняння середніх швидкостей $\overline{w_1'}$ і $\overline{w_2'}$, виражених через середню швидкість $\overline{w_1}$ в отворі діафрагми:

$$\overline{w_1'} = \frac{\rho_{1\text{сг}}}{\rho_{1\text{сг}}'} \cdot \beta^2 \cdot \overline{w_1}; \quad (16)$$

$$\overline{w_2'} = \frac{\rho_{1\text{сг}}}{\rho_{2\text{сг}}' \cdot \mu_{\Gamma}} \cdot \overline{w_1}, \quad (17)$$

де μ_{Γ} – коефіцієнт звуження струмини для газу.

Прийнявши $\frac{1}{2} \cdot \int \frac{\lambda \cdot \overline{w}^2}{d} \cdot dx = 0$ та $h_1' = h_2'$ із врахуванням рівнянь (16) та (17), розв'яжемо рівняння (12) відносно швидкості $\overline{w_1}$ і відповідно до (8) отримаємо рівняння для визначення масової витрати $q_{\text{мсг}}$ сухої частини вологого газу як

$$q_{\text{мсг}} = \rho_{1\text{сг}} \cdot F_1 \cdot \overline{w_1} = F_1 \cdot E \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{1\text{сг}} \cdot (p_{1\text{сг}} - p_{2\text{сг}})} \times$$

$$\times \sqrt{A_1 \cdot \frac{p_{1\text{сг}}}{p_{1\text{сг}} - p_{2\text{сг}}} \cdot \tau_0^2 \cdot \frac{(1 - \beta^4) \cdot \mu_{\Gamma}^2}{1 - \beta^4 \cdot \mu_{\Gamma}^2 \cdot \tau_0^2} \cdot \left(1 - \frac{A_2 \cdot p_{2\text{сг}}}{A_1 \cdot p_{1\text{сг}} \cdot \tau_0} \right)}. \quad (18)$$

Помноживши і розділивши праву частину рівняння (18) на значення коефіцієнта витікання C пристрою звуження потоку та підставивши рівняння для розрахунку перепаду тиску $\Delta p_{\text{сг}}$ на пристрої звуження потоку при проходженні через нього сухої частини вологого газу, отримаємо остаточне рівняння для розрахунку значення масової витрати $q_{\text{мсг}}$ сухої частини вологого газу

$$q_{\text{мсг}} = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot C \cdot E \cdot \varepsilon_{\text{сг}} \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p_{\text{сг}} \cdot \rho_{1\text{сг}}}, \quad (19)$$

де $\varepsilon_{\text{сг}}$ – коефіцієнт розширення сухої частини вологого газу, значення якого обчислюють за рівнянням

$$\varepsilon_{\text{сг}} = \sqrt{A_1 \cdot \frac{p_{1\text{сг}}}{\Delta p_{\text{сг}}} \cdot \tau_0^2 \cdot \frac{\phi_2 - \psi_2 + \xi - (\phi_1 - \psi_1) \cdot \beta^4 \cdot \mu_{\Gamma}^2}{1 - \beta^4 \cdot \mu_{\Gamma}^2 \cdot \tau_0^2} \cdot \left(1 - \frac{A_2 \cdot p_{2\text{сг}}}{A_1 \cdot p_{1\text{сг}} \cdot \tau_0} \right)}; \quad (20)$$

$$\Delta p_{сг} = p_{1сг} - p_{2сг} \quad (21)$$

Замінімо параметри $p_{1сг}$ та $\rho_{1сг}$ середовища перед пристроєм звуження потоку на $p_{сг}$ та $\rho_{сг}$ і виразимо параметри потоку $\Delta p_{сг}$ і середовища $p_{сг}$, $p_{2сг}$ та $\rho_{сг}$ через параметри, які вимірюються, тобто параметри потоку $\Delta p_{вг}$ і середовища $p_{вг}$ та $\rho_{вг}$ вологого газу як

$$p_{сг} = p_{вг} - \Phi \cdot p_{впmax}; \quad (22)$$

$$p_{2сг} = p_{вг} - \Delta p_{вг} - \Phi \cdot p_{2впmax}; \quad (23)$$

$$\Delta p_{сг} = \Delta p_{вг} - \Phi \cdot (p_{впmax} - p_{2впmax}); \quad (24)$$

$$\rho_{сг} = \rho_{вг} - \Phi \cdot \rho_{впmax}, \quad (25)$$

де $p_{впmax}$ – максимально можливий парціальний тиск водяної пари при термодинамічній температурі T газу перед пристроєм звуження потоку; $p_{2впmax}$ – максимально можливий парціальний тиск водяної пари при термодинамічній температурі T_2 газу після пристрою звуження потоку; $\rho_{впmax}$ – максимально можлива густина водяної пари при термодинамічній температурі T газу перед пристроєм звуження потоку.

Визначимо термодинамічну температуру вологого газу після пристрою звужування потоку під час вимірювання температури середовища до пристрою звуження потоку і навпаки.

Оскільки температура газу змінюється для кожного складника газової суміші однаково і у разі виведення рівняння витрати газу застосовували твердження, що термодинамічний процес перетікання газу через пристрій звуження потоку належить до адіабатичного, то у зв'язку з цим запишемо рівняння [4, 5, 6]

$$\frac{1}{\rho_{вг}^{K_{вг}}} = \frac{1}{\rho_{2вг}^{K_{2вг}}} = const, \quad (26)$$

де $p_{вг}$, $p_{2вг}$ – абсолютний тиск вологого газу відповідно перед пристроєм звуження потоку і після нього; $\rho_{вг}$, $\rho_{2вг}$ – густина вологого газу відповідно перед звужувальним пристроєм і після нього; $K_{вг}$, $K_{2вг}$ – показник адіабати вологого газу відповідно перед звужувальним пристроєм і після нього.

Значення густини $\rho_{вг}$ і $\rho_{2вг}$ вологого газу розраховують за рівняннями:

$$\rho_{вг} = \rho_c \cdot \frac{p_{вг} \cdot T_c \cdot z_c}{p_c \cdot T \cdot z_{вг}} = \rho_c \cdot \frac{p_{вг} \cdot T_c}{p_c \cdot T \cdot K_{вг}}; \quad (27)$$

$$\rho_{2вг} = \rho_c \cdot \frac{p_{2вг} \cdot T_c \cdot z_c}{p_c \cdot T_2 \cdot z_{2вг}} = \rho_c \cdot \frac{p_{2вг} \cdot T_c}{p_c \cdot T_2 \cdot K_{2вг}}, \quad (28)$$

де ρ_c – густина газу за стандартних умов ($p_c = 101325$ Па і $T_c = 293,15$ К); $z_{вг}$, $z_{2вг}$ – фактор стискуваності вологого газу відповідно при $p_{вг}$, T і $p_{2вг}$, T_2 ; $K_{вг}$, $K_{2вг}$ – коефіцієнт стискуваності вологого газу відповідно при $p_{вг}$, T і $p_{2вг}$, T_2 .

Підставивши рівняння (27) і (28) у рівняння (26), отримаємо рівняння

$$\frac{1}{\rho_{вг}^{K_{вг}}} \cdot T \cdot z_{вг} = \frac{1}{\rho_{2вг}^{K_{2вг}}} \cdot T_2 \cdot z_{2вг} = const; \quad (29)$$

$$\frac{1}{\rho_{вг}^{K_{вг}}} \cdot T \cdot K_{вг} = \frac{1}{\rho_{2вг}^{K_{2вг}}} \cdot T_2 \cdot K_{2вг} = const. \quad (30)$$

Під час вимірювання температури T вологого газу перед пристроєм звуження потоку значення температури T_2 вологого газу після пристрою звуження потоку визначають ітераційним способом за рівняннями:

$$T_2 = \frac{p_{\text{ВГ}}^{\kappa_{\text{ВГ}}-1} \cdot T \cdot z_{\text{ВГ}}}{p_{2\text{ВГ}}^{\kappa_{2\text{ВГ}}-1} \cdot z_{2\text{ВГ}}} = \frac{p_{\text{ВГ}}^{\kappa_{\text{ВГ}}-1} \cdot T \cdot z_{\text{ВГ}}}{p_{\text{ВГ}}^{\kappa_{\text{ВГ}}-1} \cdot \kappa_{2\text{ВГ}} \cdot T \cdot z_{\text{ВГ}}}; \quad (31)$$

$$T_2 = \frac{p_{\text{ВГ}}^{\kappa_{\text{ВГ}}-1} \cdot T \cdot K_{\text{ВГ}}}{p_{2\text{ВГ}}^{\kappa_{2\text{ВГ}}-1} \cdot K_{2\text{ВГ}}} = \frac{p_{\text{ВГ}}^{\kappa_{\text{ВГ}}-1} \cdot T \cdot K_{\text{ВГ}}}{p_{\text{ВГ}}^{\kappa_{\text{ВГ}}-1} \cdot \kappa_{2\text{ВГ}} \cdot T \cdot K_{\text{ВГ}}}. \quad (32)$$

Під час вимірювання температури T_2 вологого газу після пристрою звуження потоку значення температури T вологого газу перед пристроєм звуження потоку визначають ітераційним способом за рівняннями:

$$T = \frac{p_{2\text{ВГ}}^{\kappa_{2\text{ВГ}}-1} \cdot T_2 \cdot z_{2\text{ВГ}}}{p_{\text{ВГ}}^{\kappa_{\text{ВГ}}-1} \cdot z_{\text{ВГ}}} = \frac{\left(1 - \frac{\Delta\omega}{p_{\text{ВГ}}}\right)^{\kappa_{2\text{ВГ}}-1} \cdot T_2 \cdot z_{2\text{ВГ}}}{p_{\text{ВГ}}^{\kappa_{\text{ВГ}}-1} \cdot \kappa_{2\text{ВГ}} \cdot z_{\text{ВГ}}}; \quad (33)$$

$$T = \frac{p_{2\text{ВГ}}^{\kappa_{2\text{ВГ}}-1} \cdot T_2 \cdot K_{2\text{ВГ}}}{p_{\text{ВГ}}^{\kappa_{\text{ВГ}}-1} \cdot K_{\text{ВГ}}} = \frac{\left(1 - \frac{\Delta\omega}{p_{\text{ВГ}}}\right)^{\kappa_{2\text{ВГ}}-1} \cdot T_2 \cdot K_{2\text{ВГ}}}{p_{\text{ВГ}}^{\kappa_{\text{ВГ}}-1} \cdot \kappa_{2\text{ВГ}} \cdot K_{\text{ВГ}}}, \quad (34)$$

де $\Delta\omega$ – втрати тиску на пристрої звуження потоку.

Врахувавши поправковий коефіцієнт $K_{\text{Ш}}$, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу, поправковий коефіцієнт $K_{\text{П}}$, який враховує притуплення вхідного канта діафрагми, і залежності (24) і (25), отримаємо рівняння для розрахунку значення витрати сухої частини вологого газу як:

– для масової витрати $q_{\text{мсГ}}$ сухої частини вологого газу

$$q_{\text{мсГ}} = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot C \cdot E \cdot K_{\text{Ш}} \cdot K_{\text{П}} \cdot \varepsilon_{\text{сГ}} \cdot \sqrt{2 \cdot [\Delta p_{\text{ВГ}} - \varphi \cdot (p_{\text{впмак}} - p_{2\text{впмак}})] \cdot (\rho_{\text{ВГ}} - \varphi \cdot \rho_{\text{впмак}})}; \quad (35)$$

– для об'ємної витрати $q_{\text{всГ}}$ сухої частини вологого газу в робочих умовах

$$q_{\text{всГ}} = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot C \cdot E \cdot K_{\text{Ш}} \cdot K_{\text{П}} \cdot \varepsilon_{\text{сГ}} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p_{\text{ВГ}} - \varphi \cdot (p_{\text{впмак}} - p_{2\text{впмак}})}{\rho_{\text{ВГ}} - \varphi \cdot \rho_{\text{впмак}}}}; \quad (36)$$

– для об'ємної витрати $q_{\text{ссГ}}$ сухої частини вологого газу, приведеної до стандартних умов,

$$q_{\text{ссГ}} = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot C \cdot E \cdot K_{\text{Ш}} \cdot K_{\text{П}} \cdot \varepsilon_{\text{сГ}} \cdot \frac{1}{\rho_{\text{с}}} \cdot \sqrt{2 \cdot [\Delta p_{\text{ВГ}} - \varphi \cdot (p_{\text{впмак}} - p_{2\text{впмак}})] \cdot (\rho_{\text{ВГ}} - \varphi \cdot \rho_{\text{впмак}})}. \quad (37)$$

Якщо густину $\rho_{\text{сГ}}$ сухої частини вологого газу за робочих умов визначають за рівнянням

$$\rho_{\text{сГ}} = \rho_{\text{с}} \cdot \frac{(p_{\text{ВГ}} - \varphi \cdot p_{\text{впмак}}) \cdot T_{\text{с}}}{\rho_{\text{с}} \cdot T \cdot K_{\text{сГ}}}, \quad (38)$$

де $K_{\text{сГ}}$ – коефіцієнт стискуваності сухої частини вологого газу, значення якого обчислені для тиску $p_{\text{сГ}}$ сухої частини вологого газу; T – термодинамічна температура газу, значення якої розраховують за рівнянням

$$T = t + 273,15, \quad (39)$$

то витрату сухої частини вологого газу визначатимемо за рівняннями:

– для масової витрати $q_{m\text{сг}}$ сухої частини вологого газу

$$q_{m\text{сг}} = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot C \cdot E \cdot K_{\text{ш}} \cdot K_{\text{п}} \cdot \varepsilon_{\text{сг}} \cdot \sqrt{2 \cdot [\Delta p_{\text{вг}} - \varphi \cdot (p_{\text{впмак}} - p_{2\text{впмак}})] \cdot \rho_{\text{с}} \cdot \frac{(p_{\text{вг}} - \varphi \cdot p_{\text{впмак}}) \cdot T_{\text{с}}}{p_{\text{с}} \cdot T \cdot K_{\text{сг}}}}; \quad (40)$$

– для об'ємної витрати $q_{\text{всг}}$ сухої частини вологого газу в робочих умовах

$$q_{\text{всг}} = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot C \cdot E \cdot K_{\text{ш}} \cdot K_{\text{п}} \cdot \varepsilon_{\text{сг}} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p_{\text{вг}} - \varphi \cdot (p_{\text{впмак}} - p_{2\text{впмак}})}{\rho_{\text{с}} \cdot \frac{(p_{\text{вг}} - \varphi \cdot p_{\text{впмак}}) \cdot T_{\text{с}}}{p_{\text{с}} \cdot T \cdot K_{\text{сг}}}}}; \quad (41)$$

– для об'ємної витрати $q_{\text{сгг}}$ сухої частини вологого газу, приведеної до стандартних умов,

$$q_{\text{сгг}} = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot C \cdot E \cdot K_{\text{ш}} \cdot K_{\text{п}} \cdot \varepsilon_{\text{сг}} \cdot \sqrt{2 \cdot [\Delta p_{\text{вг}} - \varphi \cdot (p_{\text{впмак}} - p_{2\text{впмак}})] \cdot \frac{(p_{\text{вг}} - \varphi \cdot p_{\text{впмак}}) \cdot T_{\text{с}}}{\rho_{\text{с}} \cdot p_{\text{с}} \cdot T \cdot K_{\text{сг}}}}. \quad (42)$$

Визначимо рівняння для розрахунку коефіцієнта розширення $\varepsilon_{\text{сг}}$ сухої частини вологого газу. Наявна теоретична модель (20) розрахунку значення коефіцієнта розширення $\varepsilon_{\text{сг}}$, як правило, не забезпечує достатньої для практики точності, оскільки необхідно знати величини $\phi_1, \phi_2, \mu_{\text{д}}, \mu_{\text{г}}, \psi_1, \psi_2, \xi$. Якщо для сопел і труб Вентурі будь-якого типу значення коефіцієнта розширення $\varepsilon_{\text{сг}}$ збігається з теоретичною моделлю, то для діафрагм розрахунок значень величин $\phi_1, \phi_2, \mu_{\text{д}}, \mu_{\text{г}}, \psi_1, \psi_2, \xi$ є достатньо складним, що робить формулу (20) неприйнятною для практичного застосування. Тому здійснювались експериментальні дослідження впливу коефіцієнта розширення на витрату середовища. Reader–Harris [7] на базі експериментальних досліджень отримав рівняння для розрахунку значень коефіцієнта розширення сухого газу для діафрагми будь-якого типу, яке було введено у Міжнародний стандарт ISO5167–2:2003 [8], а потім у Міждержавний стандарт ГОСТ8.586.2–2005 [9] і у Національний стандарт України ДСТУ ГОСТ8.586.2:2009 [10]. Запишемо ці рівняння для визначення коефіцієнта розширення $\varepsilon_{\text{сг}}$ сухої частини вологого газу для пристроїв звуження потоку будь-якого типу:

– для діафрагм будь-якого типу

$$\varepsilon_{\text{сг}} = 1 - (0,351 + 0,256 \cdot \beta^4 + 0,93 \cdot \beta^8) \cdot (1 - \tau_{0\varepsilon}); \quad (43)$$

– для сопла або труби Вентурі будь-якого типу

$$\varepsilon_{\text{сг}} = \sqrt{\frac{p_{\text{вг}} - \varphi \cdot p_{\text{впмак}}}{\Delta p_{\text{вг}} - \varphi \cdot (p_{\text{впмак}} - p_{2\text{впмак}})} \cdot \tau_{0\varepsilon}^2 \cdot \frac{1 - \beta^4}{1 - \beta^4 \cdot \tau_{0\varepsilon}^2} \cdot \left(A_1 - A_2 \cdot \frac{p_{\text{вг}} - \Delta p_{\text{вг}} - \varphi \cdot p_{2\text{впмак}}}{p_{\text{вг}} - \varphi \cdot p_{\text{впмак}}} \cdot \frac{1}{\tau_{0\varepsilon}} \right)}, \quad (44)$$

де

$$\tau_{0\varepsilon} = \frac{(p_{\text{вг}} - \Delta p_{\text{вг}} - \varphi \cdot p_{2\text{впмак}})^{\frac{1}{\kappa_{2\text{сг}}}}}{(p_{\text{вг}} - \varphi \cdot p_{\text{впмак}})^{\frac{1}{\kappa_{\text{сг}}}}}. \quad (45)$$

Висновки

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1) відомі залежності для визначення витрати сухої частини вологого газу не враховують вплив вологості газу на перепад тиску на пристрої звужування потоку і на коефіцієнт розширення сухої частини вологого газу;

2) автор розробив:

– нову методологію визначення витрати сухої частини вологого газу;

– нові математичні моделі визначення температури середовища після пристрою звуження потоку під час вимірювання температури перед пристроєм звуження потоку (відповідно рівняння

(31), (32)) і температури середовища перед пристроєм звуження потоку під час вимірювання температури після пристрою звуження потоку (відповідно рівняння (33), (34));

– нова математична модель (24) визначення перепаду тиску на пристрої звуження потоку при проходженні через нього сухої частини вологого газу;

– нові математичні моделі (43) і (44) визначення коефіцієнта розширення сухої частини вологого газу;

– нові математичні моделі (35), (36) і (37) визначення витрати сухої частини вологого газу під час застосування потокових густиномірів;

– нові математичні моделі (40), (41) і (42) визначення витрати сухої частини вологого газу за аналітичної залежності густини сухої частини вологого газу в робочих умовах від параметрів середовища.

Рівняння можуть бути реалізовані у програмах обчислювачів витрати і кількості, що дасть змогу адаптувати їх до роботи в системах обліку витрати та кількості сухої частини вологого газу. Крім того, рівняння рекомендується для введення у нормативні документи з вимірювання витрати та кількості сухої частини вологого газу.

Отримані математичні моделі дають змогу підвищити точність вимірювання витрати та кількості сухої частини вологого газу, а також і витрату енерговмісту газу.

1. РД 50-213–80. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. – М.: Изд-во стандартов, 1982. 2. ГОСТ 8.5 86.5–2005 (ИСО 5167) . Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 5. Методика выполнения измерений. 3. ДСТУ ГОСТ 8.586.5 :2009. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини і газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 5. Методика виконання вимірювань (ГОСТ 8.586 .5–2005, IDT). 4. Пістун Є.П., Лесовой Л.В. Нормування витратомірів змінного перепаду тиску. – Львів Видавництво ЗАТ “Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв”, 20 06, 57 6 с. 5. ГОСТ 8.586.1 –2005 (ИСО5167-1:2003). Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 1. Принцип метода измерений и общие требования. 6. ДСТУ ГОСТ 8.586.1:20 09 (ИСО 516 7-1:2003) Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини і газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 1. Принцип методу вимірювань та загальні вимоги (ГОСТ 8.586.1–2005(ИСО 5167-1:2003), IDT; ISO 5167-1:2003, MOD). 7. Reader-Harris, M. J. The equation for the expansibility factor for orifice plates // FLOMEKO 98. – Sweden, June 1998. – p. 2 09–214. 8. I SO 5167–2:2003. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full - part 2: orifice plates. 9. ГОСТ 8.586.2–200 5 (ИСО 5167-2:2003) . Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 2. Диафрагмы. Технические требования. 10. ДСТУ ГОСТ 8.586.2: 2009 (ИСО 5167-2: 2003) Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини і газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 2. Діафрагми. Технічні вимоги (ГОСТ 8.586.2–2005(ИСО 5167-2:2003), IDT; ISO 5167-2:2003, MOD).