

## РОЗРАХУНОК НЕВИЗНАЧЕНОСТІ РЕЗУЛЬТАТУ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ТА КІЛЬКОСТІ СУХОЇ ЧАСТИНИ ВОЛОГОГО ГАЗУ ЗА МЕТОДОМ ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПОТОКОВИХ ГУСТИНОМІРІВ

© Лесовой Л., 2008

**У статті розглянуто методика розрахунку невизначеності результату вимірювання витрати та кількості сухої частини вологого газу за методом змінного перепаду тиску із застосуванням потокових густиномірів для будь-яких типів конфігурації витратоміра.**

**Method calculation of uncertainty result of measurement of fluid flow and quantity dry path of humidity gas by means of the differential pressure method with using of flow density meter for any-which types configure flowmeter are considered in this paper.**

**Постановка проблеми.** Економія паливно-енергетичних ресурсів, яка безпосередньо залежить від кількості паливно-енергетичних ресурсів, що пройшла у замкнутому трубопроводі круглого перерізу за одиницю часу, є головною проблемою сьогодення. Найпоширенішим методом вимірювання витрати та кількості природного газу (надалі газ), який так само належить до паливно-енергетичних ресурсів, є метод змінного перепаду тиску. За допомогою цього методу можна вимірювати не тільки витрату і кількість сухого газу, але також витрату і кількість сухої частини вологого газу. Під час вимірювання витрати та кількості газу широкого застосування набувають потокові густиноміри, які вимірюють густину газу у робочих умовах. Алгоритм розрахунку витрати та кількості як сухого газу, так і сухої частини вологого газу, за методом змінного перепаду тиску із застосуванням потокових густиномірів наведений у Міждержавних стандартах ГОСТ8.586.1,2,3,4,5–2005 [1–5] та стандартах України ДСТУ ГОСТ8.586.1,2,3,4,5–2008 [6–10]. Розрахунок же невизначеностей результату вимірювання витрати та кількості газу із застосуванням потокових густиномірів наведений лише для сухого газу [5, 10], а для сухої частини вологого газу – він захований за основними рівняннями невизначеності. Тому відповідно до Закону України “Про метрологію та метрологічну діяльність” [11]: “Результати вимірювань можуть бути використані за умови, якщо відомі відповідні характеристики похибок вимірювань” – виникає необхідність, застосовуючи вимоги стандартів [5, 10], вивести рівняння для розрахунку невизначеностей результату вимірювання витрати та кількості сухої частини вологого газу за методом змінного перепаду тиску із застосуванням потокових густиномірів, а задача отримання таких рівнянь є дуже актуальною.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** До прийняття стандартів [1–5], в Україні розрахунок невизначеності (похибки) результату вимірювання витрати та кількості газу із застосуванням потокових густиномірів нормувався РД50-213-80 [12] та ГОСТ8.563.1,2,3-97 [13-15]. Питання розрахунку витрати і кількості та невизначеності результату вимірювання витрати та кількості сухої частини вологого газу розглядалися і в [16]. Виконаними дослідженнями було встановлено, що відносні похибки (тепер невизначеності) результату вимірювання витрати та кількості сухої частини вологого газу із застосуванням потокових густиномірів давали завищені значення [12, 16] або були зовсім відсутні [14].

**Формулювання цілі статті.** Метою роботи є сформулювати основні засади та отримати рівняння для розрахунку невизначеності результату вимірювання витрати та кількості сухої частини вологого газу за методом змінного перепаду тиску із застосуванням потокових густиномірів.

**Виклад основного матеріалу.** Оскільки сухий газ є одним із випадків вологого газу (коли значення вологості дорівнює нулю), то запишемо рівняння для розрахунку масової витрати  $q_{m_{cz}}$  сухої частини вологого газу за наявності потокового густиноміра [5, 10, 16]

$$q_{m_{cz}} = q_{m_{bz}} \frac{r_{cz}}{r_{bz}}, \quad (1)$$

де  $q_{m_{bz}}$  – масова витрата вологого газу;  $r_{bz}$  – густина вологого газу в робочих умовах (абсолютному тиску  $p$  та термодинамічній температурі  $T$ ), що вимірюється густиноміром;  $r_{cz}$  – густина сухої частини вологого газу, яка визначається за рівнянням [5, 10, 16]:

– якщо задана абсолютна вологість  $f$  газу

$$r_{cz} = r - f; \quad (2)$$

– якщо задана відносна вологість  $j$  газу

$$r_{cz} = r - j r_{bn \max}; \quad (3)$$

$r_{bn \max}$  – густина водяних парів у газі.

Якщо термодинамічна температура  $T$  газу не перевищує температуру насичення водяної пари  $T_{нас}$ , яка відповідає абсолютному тиску  $p$  газу, то густину  $r_{bn \max}$  приймають такою, що дорівнює густині насиченої водяної пари  $r_{n.n}$ .

Якщо термодинамічна температура  $T$  газу перевищує температуру насичення водяної пари  $T_{нас}$ , яка відповідає абсолютному тиску  $p$  газу, то густину  $r_{bn \max}$  приймають такою, що дорівнює густині перегрітої водяної пари  $r_{n.n}$ , яка розраховується за значеннями термодинамічної температури  $T$  і абсолютного тиску  $p$  газу.

Масова витрата вологого газу розраховується за рівнянням [5, 10, 12, 14, 16]

$$q_{m_{bz}} = \frac{p}{4} d^2 C E K_{ш} K_n e \sqrt{2 \Delta p r_{bz}}, \quad (4)$$

де  $d$  – діаметр отвору або горловини звужуючого пристрою за робочої температури  $t$ ;  $C$  – коефіцієнт витікання;  $E$  – коефіцієнт швидкості входу, який розраховується за рівнянням

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}}; \quad (5)$$

$K_{ш}$  – поправковий коефіцієнт, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу (для еліптичних сопел та труб Вентурі будь-якого типу  $K_{ш} = 1$ );  $K_n$  – поправковий коефіцієнт, який враховує притуплення вхідного канту діафрагми (для сопел та труб Вентурі будь-якого типу  $K_n = 1$ );  $e$  – коефіцієнт розширення;  $\Delta p$  – перепад тиску на звужуючому пристрої;  $D$  – внутрішній діаметр трубопроводу за робочої температури  $t$ .

Підставивши рівняння (2) або (3) і рівняння (4), (5) у рівняння (1), отримаємо рівняння для розрахунку масової витрати сухої частини вологого газу із застосуванням потокового густиноміра у вигляді:

– якщо задана абсолютна вологість  $f$  газу

$$q_{m_{\text{гз}}} = \frac{p}{4} \frac{d^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}} CEK_{\text{ш}} K_n e^{\sqrt{2\Delta p}} \left( \sqrt{r_{\text{гз}}} - \frac{f}{\sqrt{r_{\text{гз}}}} \right); \quad (6)$$

– якщо задана відносна вологість  $j$  газу

$$q_{m_{\text{гз}}} = \frac{p}{4} \frac{d^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}} CEK_{\text{ш}} K_n e^{\sqrt{2\Delta p}} \left( \sqrt{r_{\text{гз}}} - \frac{j r_{\text{гз max}}}{\sqrt{r_{\text{гз}}}} \right). \quad (7)$$

За отриманим рівнянням (7) виведемо рівняння для розрахунку невизначеності результату вимірювання витрати та кількості сухої частини вологого газу із застосуванням потокових густиномірів.

Достовірність результату вимірювання витрати та кількості середовища оцінюється невизначеністю результату вимірювання витрати та кількості середовища.

Невизначеністю називають параметр, який пов'язаний з результатом вимірювання і характеризує розсіяння значень, які можуть бути обґрунтовано приписані вимірюваній величині.

Розширеною невизначеністю називають величину, яка визначає інтервал навколо результату вимірювання, в межах якого, можна очікувати, знаходиться більша частина розподілу значень, які можуть бути обґрунтовано приписані вимірюваній величині [5, 10].

Відносну розширену невизначеність  $U'_{q_{m_{\text{гз}}}}$  результату вимірювання масової витрати сухої частини вологого газу із застосуванням потокових густиномірів, яка визначається непрямим методом та пов'язана функціональною залежністю з коефіцієнтами та параметрами, що входять у рівняння витрати (6) або (7), розраховують за рівнянням:

– якщо задана абсолютна вологість  $f$  газу

$$U'_{q_{m_{\text{гз}}}} = \left[ (J_d U'_d)^2 + (J_D U'_D)^2 + (J_C U'_C)^2 + (J_{K_{\text{ш}}} U'_{K_{\text{ш}}})^2 + (J_{K_n} U'_{K_n})^2 + (J_e U'_e)^2 + (J_{\Delta p} U'_{\Delta p})^2 + (J_{r_{\text{гз}}} U'_{r_{\text{гз}}})^2 + (J_f U'_f)^2 \right]^{0,5}, \quad (8)$$

– якщо задана відносна вологість  $j$  газу

$$U'_{q_{m_{\text{гз}}}} = \left[ (J_d U'_d)^2 + (J_D U'_D)^2 + (J_C U'_C)^2 + (J_{K_{\text{ш}}} U'_{K_{\text{ш}}})^2 + (J_{K_n} U'_{K_n})^2 + (J_e U'_e)^2 + (J_{\Delta p} U'_{\Delta p})^2 + (J_{r_{\text{гз}}} U'_{r_{\text{гз}}})^2 + (J_j U'_j)^2 + (J_{r_{\text{гз max}}} U'_{r_{\text{гз max}}})^2 \right]^{0,5}, \quad (9)$$

де  $U'_d, U'_D, U'_C, U'_{K_{\text{ш}}}, U'_{K_n}, U'_e, U'_{\Delta p}, U'_{r_{\text{гз}}}, U'_f, U'_j, U'_{r_{\text{гз max}}}$  – відносні розширені невизначеності результатів розрахунку або вимірювання відповідно діаметра отвору або горловини звужуючого пристрою, внутрішнього діаметра трубопроводу, коефіцієнта витікання, поправкового коефіцієнта, що враховує шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу, поправкового коефіцієнта, що враховує притуплення вхідного канту діафрагми, коефіцієнта розширення, перепаду тиску на звужуючому пристрої, густини вологого газу, абсолютної вологості газу, відносної вологості газу, густини водяних парів у газі;  $J_d, J_D, J_C, J_{K_{\text{ш}}}, J_{K_n}, J_e, J_{\Delta p}, J_{r_{\text{гз}}}, J_f, J_j, J_{r_{\text{гз max}}}$  – відносні коефіцієнти чутливості масової витрати сухої частини вологого газу до зміни відповідно діаметра отвору або горловини звужуючого пристрою, внутрішнього діаметра трубопроводу, коефіцієнта

вигукання, поправкового коефіцієнта, що враховує шорсткiсть внутрiшньої поверхнi трубопроводу, поправкового коефіцієнта, що враховує притуплення вхiдного канту дiафрагми, коефіцієнта розширення, перепаду тиску на звужуючому пристрої, густини вологого газу, абсолютної вологостi газу, вiдносної вологостi газу, густини водяних парiв у газi.

Значення вiдносного коефіцієнта чутливостi  $J_{y_i}$  масової витрати сухої частини вологого газу до змiни i-го коефіцієнта або параметра  $y_i$  визначається за рiвнянням [5, 10]

$$J_{y_i} = \frac{\partial q_{m_{сг}}}{\partial y_i} \frac{y_i}{q_{m_{сг}}}, \quad (10)$$

де  $\frac{\partial q_{m_{сг}}}{\partial y_i}$  – часткова похiдна масової витрати  $q_{m_{сг}}$  сухої частини вологого газу за коефіцієнтом або параметром  $y_i$ .

Застосовуючи рiвняння (10), визначимо вiдносні коефіцієнти чутливостi до змiни i-го коефіцієнта або параметра, що входять у рiвняння витрати (6) або (7), i запишемо їх у таблицю.

**Рiвняння для розрахунку вiдносних коефіцієнтiв чутливостi  $J_d, J_D, J_C, J_{K_u}, J_{K_n}, J_e, J_{\Delta p},$**

**$J_{r_{сг}}, J_f, J_j$  та  $J_{r_{ен\max}}$**

Вiдносний коефіцієнт чутливостi	Рiвняння для розрахунку вiдносним коефіцієнтiв чутливостi
$J_d$	$\frac{2}{1-b^4}^*$
$J_D$	$\frac{2b^4}{1-b^4}^*$
$J_C$	1
$J_{K_u}$	1
$J_{K_n}$	1
$J_e$	1
$J_{\Delta p}$	0,5
$J_{r_{сг}}$	якщо задана абсолютна вологiсть $f$ газу $0,5 \frac{r_{сг} + f}{r_{сг} - f}$
	якщо задана вiдносна вологiсть $j$ газу $0,5 \frac{r_{сг} + j r_{ен\max}}{r_{сг} - j r_{ен\max}}$
$J_f$	$-\frac{f}{r_{сг} - f}$
$J_j$	$-\frac{j r_{ен\max}}{r_{сг} - j r_{ен\max}}$
$J_{r_{ен\max}}$	$-\frac{j r_{ен\max}}{r_{сг} - j r_{ен\max}}$
* У формулах $b$ вiдносний дiаметр звужуючого пристрою, який розраховується за рiвнянням [1] $b = \frac{d}{D}$	

Підставивши рівняння для розрахунку відносних коефіцієнтів чутливості, які наведені у таблиці, у рівняння (8) або (9), отримаємо рівняння для розрахунку відносної розширеної невизначеності результату вимірювання масової витрати сухої частини вологого газу із застосуванням потокових густиномірів:

– якщо задана абсолютна вологість  $f$  газу

$$U'_{q_{mz}} = \left\{ \left( \frac{2}{1-b^4} U'_d \right)^2 + \left( \frac{2b^4}{1-b^4} U'_D \right)^2 + U'^2_C + U'^2_{K_u} + U'^2_{K_n} + U'^2_e + \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \left[ U'^2_{\Delta p} + \left( \frac{r_{\text{вз}} + f}{r_{\text{вз}} - f} U'_{r_{\text{вз}}} \right)^2 \right] + \left( \frac{f}{r_{\text{вз}} - f} U'_f \right)^2 \right\}^{0,5} ; \quad (11)$$

– якщо задана відносна вологість  $j$  газу

$$U'_{q_{mz}} = \left\{ \left( \frac{2}{1-b^4} U'_d \right)^2 + \left( \frac{2b^4}{1-b^4} U'_D \right)^2 + U'^2_C + U'^2_{K_u} + U'^2_{K_n} + U'^2_e + \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \left[ U'^2_{\Delta p} + \left( \frac{r_{\text{вз}} + j r_{\text{вн max}}}{r_{\text{вз}} - j r_{\text{вн max}}} U'_{r_{\text{вз}}} \right)^2 \right] + \left( \frac{j r_{\text{вн max}}}{r_{\text{вз}} - j r_{\text{вн max}}} \right)^2 (U'^2_j + U'^2_{r_{\text{вн max}}})^2 \right\}^{0,5} . \quad (12)$$

Для сухого газу, коли абсолютна вологість або відносна вологість дорівнюють нулю, рівняння (11) та (12) перетворюються у рівняння для розрахунку відносної розширеної невизначеності результату вимірювання витрати сухого газу із застосуванням густиномірів, яке має вигляд [5, 10, 16]

$$U'_{q_m} = \left\{ \left( \frac{2}{1-b^4} U'_d \right)^2 + \left( \frac{2b^4}{1-b^4} U'_D \right)^2 + U'^2_C + U'^2_{K_u} + U'^2_{K_n} + U'^2_e + \frac{1}{4} [U'^2_{\Delta p} + U'^2_r] \right\}^{0,5} , \quad (13)$$

де  $U'_r$  – відносна розширена невизначеність результату вимірювання густини сухого газу.

Під час вимірювання витрати та кількості сухої частини вологого газу за допомогою обчислювачів витрати із застосуванням потокових густиномірів необхідно враховувати невизначеність результату розрахунку витрати цим обчислювачем  $U'_{K_q}$ . Невизначеність  $U'_{K_q}$  встановлюють за паспортними даними обчислювача витрати. Відносна розширена невизначеність результату вимірювання витрати сухого газу із застосуванням обчислювачів витрати та потокових густиномірів розраховується за рівняннями:

– якщо задана абсолютна вологість  $f$  газу

$$U'_{q_{mz}} = \left\{ U'^2_{K_q} + \left( \frac{2}{1-b^4} U'_d \right)^2 + \left( \frac{2b^4}{1-b^4} U'_D \right)^2 + U'^2_C + U'^2_{K_u} + U'^2_{K_n} + U'^2_e + \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \left[ U'^2_{\Delta p} + \left( \frac{r_{\text{вз}} + f}{r_{\text{вз}} - f} U'_{r_{\text{вз}}} \right)^2 \right] + \left( \frac{f}{r_{\text{вз}} - f} U'_f \right)^2 \right\}^{0,5} ; \quad (14)$$

– якщо задана відносна вологість  $j$  газу

$$U'_{q_{mz}} = \left\{ U'^2_{K_q} + \left( \frac{2}{1-b^4} U'_d \right)^2 + \left( \frac{2b^4}{1-b^4} U'_D \right)^2 + U'^2_C + U'^2_{K_u} + U'^2_{K_n} + U'^2_e + \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \left[ U'^2_{\Delta p} + \left( \frac{r_{\text{вз}} + j r_{\text{вн max}}}{r_{\text{вз}} - j r_{\text{вн max}}} U'_{r_{\text{вз}}} \right)^2 \right] + \left( \frac{j r_{\text{вн max}}}{r_{\text{вз}} - j r_{\text{вн max}}} \right)^2 (U'^2_j + U'^2_{r_{\text{вн max}}})^2 \right\}^{0,5} ; \quad (15)$$

– для сухого газу

$$U'_{q_m} = \left\{ U'^2_{Kq} + \left( \frac{2}{1-b^4} U'_d \right)^2 + \left( \frac{2b^4}{1-b^4} U'_D \right)^2 + U'^2_C + U'^2_{K_u} + U'^2_{K_n} + U'^2_e + \right. \\ \left. + \frac{1}{4} [U'^2_{\Delta p} + U'^2_r] \right\}^{0,5} \quad (16)$$

Об'ємна ж витрата  $q_{c_{cz}}$  сухої частини вологого газу, зведена до стандартних умов, розраховується за рівнянням [5, 10, 16]

$$q_{c_{cz}} = \frac{q_{m_{cz}}}{r_c}, \quad (17)$$

де  $r_c$  – густина газу в стандартних умовах.

Відносні коефіцієнти чутливості об'ємної витрати  $q_{c_{cz}}$  до зміни відповідно масової витрати  $q_{m_{cz}}$  і густини  $r_c$  визначаються за рівняннями

$$J_{q_{m_{cz}}} = \frac{\partial q_{c_{cz}}}{\partial q_{m_{cz}}} \frac{q_{m_{cz}}}{q_{c_{cz}}} = \frac{1}{r_c} \frac{q_{m_{cz}}}{q_{c_{cz}}} = 1; \quad (18)$$

$$J_{r_c} = \frac{\partial q_{c_{cz}}}{\partial r_c} \frac{r_c}{q_{c_{cz}}} = -\frac{q_{m_{cz}}}{r_c^2} \frac{r_c}{q_{c_{cz}}} = -1. \quad (19)$$

Відносна невизначеність результату вимірювання об'ємної витрати із застосуванням потокових густиномірів буде визначатись за рівняннями

– якщо задана абсолютна вологість  $f$  газу

$$U'_{q_{c_{cz}}} = (U'^2_{q_{m_{cz}}} + U'^2_{r_c})^{0,5} = \left\{ \left( \frac{2}{1-b^4} U'_d \right)^2 + \left( \frac{2b^4}{1-b^4} U'_D \right)^2 + U'^2_C + U'^2_{K_u} + U'^2_{K_n} + U'^2_e + \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \left[ U'^2_{\Delta p} + \left( \frac{r_{\theta z} + f}{r_{\theta z} - f} U'_{r_{\theta z}} \right)^2 \right] + \left( \frac{f}{r_{\theta z} - f} U'_f \right)^2 + U'^2_{r_c} \right\}^{0,5} \quad ;(20)$$

– якщо задана відносна вологість  $j$  газу

$$U'_{q_{c_{cz}}} = (U'^2_{q_{m_{cz}}} + U'^2_{r_c})^{0,5} = \left\{ \left( \frac{2}{1-b^4} U'_d \right)^2 + \left( \frac{2b^4}{1-b^4} U'_D \right)^2 + U'^2_C + U'^2_{K_u} + U'^2_{K_n} + U'^2_e + \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \left[ U'^2_{\Delta p} + \left( \frac{r_{\theta z} + j r_{\theta n \max}}{r_{\theta z} - j r_{\theta n \max}} U'_{r_{\theta z}} \right)^2 \right] + \left( \frac{j r_{\theta n \max}}{r_{\theta z} - j r_{\theta n \max}} \right)^2 (U'^2_j + U'^2_{r_{\theta n \max}}) + U'^2_{r_c} \right\}^{0,5} ;(21)$$

– для сухого газу

$$U'_{q_c} = (U'^2_{q_m} + U'^2_{r_c})^{0,5} = \left\{ \left( \frac{2}{1-b^4} U'_d \right)^2 + \left( \frac{2b^4}{1-b^4} U'_D \right)^2 + U'^2_C + U'^2_{K_u} + \right. \\ \left. + U'^2_{K_n} + U'^2_e + \frac{1}{4} [U'^2_{\Delta p} + U'^2_r] + U'^2_{r_c} \right\}^{0,5} \quad (22)$$

Кількість сухої частини вологого газу, яка пройшла по вимірювальному трубопроводу за одиницю часу, можна виразити в одиницях маси газу  $m_{cz}$  або в одиницях об'єму газу  $V_{c_{cz}}$ ,

зведеного до стандартних умов, являє собою інтеграл функції відповідно масової витрати  $q_{m_{cz}}(t)$  середовища або об'ємної витрати  $q_{c_{cz}}(t)$  середовища, зведеної до стандартних умов, в часі  $t$  і визначається за рівняннями:

$$m_{cz} = \int_{t_n}^{t_k} q_{m_{cz}}(t) dt ; \quad (23)$$

$$V_{c_{cz}} = \int_{t_n}^{t_k} q_{c_{cz}}(t) dt , \quad (24)$$

де  $t_n$  і  $t_k$  – час відповідно початку і кінця періоду часу інтегрування.

Під час вимірювання кількості сухої частини вологого газу відносна розширена невизначеність результату її вимірювання залежатиме від конфігурації витратоміра. Витратомір може бути як з роздільним вимірюванням параметрів потоку, так і з обчислювачем витрати та кількості.

Під час вимірювання кількості сухої частини вологого газу витратомірами з роздільним вимірюванням параметрів потоку за результатами планіметрування діаграм або показами інтегруючих пристроїв відносно розширену невизначеність результату розрахунку кількості будемо розраховувати за рівняннями:

– якщо задана абсолютна вологість  $f$  газу

$$U'_{m_{cz}} = \left\{ \left( \frac{2}{1-b^4} U'_d \right)^2 + \left( \frac{2b^4}{1-b^4} U'_D \right)^2 + U'^2_C + U'^2_{K_u} + U'^2_{K_n} + U'^2_e + U'^2_{\Delta p} + U'^2_{r_{\theta z}} + \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \left[ (U'^2_{\Delta p} + U'^2_{t\Delta p} + U'^2_{nl\Delta p}) + \left( \frac{r_{\theta z} + f}{r_{\theta z} - f} \right)^2 (U'^2_{r_{\theta z}} + U'^2_{tr_{\theta z}} + U'^2_{nlr_{\theta z}}) \right] + \left( \frac{f}{r_{\theta z} - f} U'_f \right)^2 \right\}^{0,5}; \quad (25)$$

$$U'_{V_{cz}} = \left\{ \left( \frac{2}{1-b^4} U'_d \right)^2 + \left( \frac{2b^4}{1-b^4} U'_D \right)^2 + U'^2_C + U'^2_{K_u} + U'^2_{K_n} + U'^2_e + U'^2_{\Delta p} + U'^2_{r_{\theta z}} + \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \left[ U'^2_{\Delta p} + U'^2_{t\Delta p} + U'^2_{nl\Delta p} + \left( \frac{r_{\theta z} + f}{r_{\theta z} - f} \right)^2 (U'^2_{r_{\theta z}} + U'^2_{tr_{\theta z}} + U'^2_{nlr_{\theta z}}) \right] + \left( \frac{f}{r_{\theta z} - f} \right)^2 U'^2_f + U'^2_{r_c} \right\}^{0,5}; \quad (26)$$

– якщо задана відносна вологість  $j$  газу

$$U'_{m_{cz}} = \left\{ \left( \frac{2}{1-b^4} U'_d \right)^2 + \left( \frac{2b^4}{1-b^4} U'_D \right)^2 + U'^2_C + U'^2_{K_u} + U'^2_{K_n} + U'^2_e + U'^2_{\Delta p} + U'^2_{r_{\theta z}} + \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \left[ (U'^2_{\Delta p} + U'^2_{t\Delta p} + U'^2_{nl\Delta p}) + \left( \frac{r_{\theta z} + j r_{\theta n \max}}{r_{\theta z} - j r_{\theta n \max}} \right)^2 (U'^2_{r_{\theta z}} + U'^2_{tr_{\theta z}} + U'^2_{nlr_{\theta z}}) \right] + \right. \\ \left. + \left( \frac{j r_{\theta n \max}}{r_{\theta z} - j r_{\theta n \max}} \right)^2 (U'^2_j + U'^2_{r_{\theta n \max}}) \right\}^{0,5}; \quad (27)$$

$$\begin{aligned}
U'_{V_{cz}} = & \left\{ \left( \frac{2}{1-b^4} U'_d \right)^2 + \left( \frac{2b^4}{1-b^4} U'_D \right)^2 + U'_C{}^2 + U'_{K_u}{}^2 + U'_{K_n}{}^2 + U'_e{}^2 + U'_{\Delta p}{}^2 + U'_{r_{\epsilon z}}{}^2 + \right. \\
& + \frac{1}{4} \left[ U'_{\Delta p}{}^2 + U'_{t\Delta p}{}^2 + U'_{nl\Delta p}{}^2 + \left( \frac{r_{\epsilon z} + j r_{\epsilon n \max}}{r_{\epsilon z} - j r_{\epsilon n \max}} \right)^2 (U'_{r_{\epsilon z}}{}^2 + U'_{tr_{\epsilon z}}{}^2 + U'_{nlr_{\epsilon z}}{}^2) \right] + \quad ; \quad (28) \\
& \left. + \left( \frac{j r_{\epsilon n \max}}{r_{\epsilon z} - j r_{\epsilon n \max}} \right)^2 (U'_j{}^2 + U'_{r_{\epsilon n \max}}{}^2) + U'_{r_c}{}^2 \right\}^{0,5}
\end{aligned}$$

– для сухого газу

$$\begin{aligned}
U'_m = & \left[ \left( \frac{2}{1-b^4} U'_d \right)^2 + \left( \frac{2b^4}{1-b^4} U'_D \right)^2 + U'_C{}^2 + U'_{K_u}{}^2 + U'_{K_n}{}^2 + U'_e{}^2 + U'_{\Delta p}{}^2 + U'_r{}^2 + \right. \\
& \left. + \frac{1}{4} (U'_{\Delta p}{}^2 + U'_{t\Delta p}{}^2 + U'_{nl\Delta p}{}^2 + U'_r{}^2 + U'_{tr}{}^2 + U'_{nlr}{}^2) \right]^{0,5} \quad ; \quad (29)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U'_{V_c} = & \left[ \left( \frac{2}{1-b^4} U'_d \right)^2 + \left( \frac{2b^4}{1-b^4} U'_D \right)^2 + U'_C{}^2 + U'_{K_u}{}^2 + U'_{K_n}{}^2 + U'_e{}^2 + U'_{\Delta p}{}^2 + U'_r{}^2 + \right. \\
& \left. + \frac{1}{4} (U'_{\Delta p}{}^2 + U'_{t\Delta p}{}^2 + U'_{nl\Delta p}{}^2 + U'_r{}^2 + U'_{tr}{}^2 + U'_{nlr}{}^2) + U'_{r_c}{}^2 \right]^{0,5} \quad , \quad (30)
\end{aligned}$$

де  $U'_{\Delta p}$ ,  $U'_{r_{\epsilon z}}$ ,  $U'_{r_c}$  – відносна розширена невизначеність результату визначення середнього значення витрати за заданий інтервал часу, обумовлений усередненням відповідно перепаду тиску, густини вологого газу та густини сухого газу;  $U'_{t\Delta p}$ ,  $U'_{tr_{\epsilon z}}$ ,  $U'_{tr}$  – відносна розширена невизначеність ходу діаграми записування відповідно перепаду тиску, густини вологого газу та густини сухого газу;  $U'_{nl\Delta p}$ ,  $U'_{nlr_{\epsilon z}}$ ,  $U'_{nlr}$  – відносна розширена невизначеність результату планіметривання діаграми записування відповідно перепаду тиску, густини вологого газу та густини сухого газу.

Під час вимірювання кількості сухої частини вологого газу за допомогою обчислювачів витрати та кількості відносна розширена невизначеність результату вимірювання кількості цього середовища розраховуватиметься за рівняннями:

– якщо задана абсолютна вологість  $f$  газу

$$\begin{aligned}
U'_{m_{cz}} = & \left\{ U'_{K_q}{}^2 + U'_t{}^2 + \left( \frac{2}{1-b^4} U'_d \right)^2 + \left( \frac{2b^4}{1-b^4} U'_D \right)^2 + U'_C{}^2 + U'_{K_u}{}^2 + U'_{K_n}{}^2 + U'_e{}^2 + \right. \\
& \left. + \frac{1}{4} \left[ (U'_{\Delta p}{}^2 + U'_{\Delta p}{}^2) + \left( \frac{r_{\epsilon z} + f}{r_{\epsilon z} - f} \right)^2 (U'_{r_{\epsilon z}}{}^2 + U'_{\Delta r_{\epsilon z}}{}^2) \right] + \left( \frac{f}{r_{\epsilon z} - f} U'_f \right)^2 \right\}^{0,5} \quad ; \quad (31)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U'_{V_{cz}} = & \left\{ U'_{K_q}{}^2 + U'_t{}^2 + \left( \frac{2}{1-b^4} U'_d \right)^2 + \left( \frac{2b^4}{1-b^4} U'_D \right)^2 + U'_C{}^2 + U'_{K_u}{}^2 + U'_{K_n}{}^2 + U'_e{}^2 + \right. \\
& \left. + \frac{1}{4} \left[ U'_{\Delta p}{}^2 + U'_{\Delta p}{}^2 + \left( \frac{r_{\epsilon z} + f}{r_{\epsilon z} - f} \right)^2 (U'_{r_{\epsilon z}}{}^2 + U'_{\Delta r_{\epsilon z}}{}^2) \right] + \left( \frac{f}{r_{\epsilon z} - f} \right)^2 U'_f{}^2 + U'_{r_c}{}^2 \right\}^{0,5} \quad ; \quad (32)
\end{aligned}$$



– якщо задана відносна вологість  $j$  газу

$$U'_{m_{cz}} = \left\{ U'_{Kq}{}^2 + U'_t{}^2 + \left( \frac{2}{1-b^4} U'_d \right)^2 + \left( \frac{2b^4}{1-b^4} U'_D \right)^2 + U'_C{}^2 + U'_{K_u}{}^2 + U'_{K_n}{}^2 + U'_e{}^2 + \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \left[ U'_{\Delta p}{}^2 + U'_{D\Delta p}{}^2 + \left( \frac{r_{\text{вз}} + j r_{\text{вн max}}}{r_{\text{вз}} - j r_{\text{вн max}}} \right)^2 (U'_{r_{\text{вз}}}{}^2 + U'_{Dr_{\text{вз}}}{}^2) \right] + \left( \frac{j r_{\text{вн max}}}{r_{\text{вз}} - j r_{\text{вн max}}} \right)^2 (U'_j{}^2 + U'_{r_{\text{вн max}}}{}^2) \right\}^{0.5}; (33)$$

$$U'_{V_{cz}} = \left\{ U'_{Kq}{}^2 + U'_t{}^2 + \left( \frac{2}{1-b^4} U'_d \right)^2 + \left( \frac{2b^4}{1-b^4} U'_D \right)^2 + U'_C{}^2 + U'_{K_u}{}^2 + U'_{K_n}{}^2 + U'_e{}^2 + \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \left[ U'_{\Delta p}{}^2 + U'_{D\Delta p}{}^2 + \left( \frac{r_{\text{вз}} + j r_{\text{вн max}}}{r_{\text{вз}} - j r_{\text{вн max}}} \right)^2 (U'_{r_{\text{вз}}}{}^2 + U'_{Dr_{\text{вз}}}{}^2) \right] + \left( \frac{j r_{\text{вн max}}}{r_{\text{вз}} - j r_{\text{вн max}}} \right)^2 (U'_j{}^2 + U'_{r_{\text{вн max}}}{}^2) + U'_{r_c}{}^2 \right\}^{0.5}; (34)$$

– для сухого газу

$$U'_m = \left[ U'_{Kq}{}^2 + U'_t{}^2 + \left( \frac{2}{1-b^4} U'_d \right)^2 + \left( \frac{2b^4}{1-b^4} U'_D \right)^2 + U'_C{}^2 + U'_{K_u}{}^2 + U'_{K_n}{}^2 + U'_e{}^2 + \right. \\ \left. + \frac{1}{4} (U'_{\Delta p}{}^2 + U'_{D\Delta p}{}^2 + U'_r{}^2 + U'_{Dr}{}^2) \right]^{0.5}; (35)$$

$$U'_{V_c} = \left[ U'_{Kq}{}^2 + U'_t{}^2 + \left( \frac{2}{1-b^4} U'_d \right)^2 + \left( \frac{2b^4}{1-b^4} U'_D \right)^2 + U'_C{}^2 + U'_{K_u}{}^2 + U'_{K_n}{}^2 + U'_e{}^2 + \right. \\ \left. + \frac{1}{4} (U'_{\Delta p}{}^2 + U'_{D\Delta p}{}^2 + U'_r{}^2 + U'_{Dr}{}^2) + U'_{r_c}{}^2 \right]^{0.5}; (36)$$

де  $U'_t$  – відносна розширена невизначеність інтервалу часу, протягом якого розраховується кількість газу;  $U'_{D\Delta p}$ ,  $U'_{Dr_{\text{вз}}}$ ,  $U'_{Dr}$  – відносна розширена невизначеність, обумовлена дискретизацією аналогового сигналу відповідно перепаду тиску, густини вологого газу та густини сухого газу в часі  $t$ .

**Висновки.** Отримані рівняння, які не порушують вимоги стандартів [1–10] і Закону України “Про метрологію та метрологічну діяльність” [11], дозволять усунути неточності у формулюванні вимог щодо розрахунку невизначеностей результату вимірювання витрати та кількості сухої частини вологого газу за методом змінного перепаду тиску із застосуванням потокових густинимірів та підвищать точність обліку енергоносіїв за методом змінного перепаду тиску.

1. ГОСТ 8.586.1342005 (ISO 5167-1:2003). Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч. 1. Принцип метода измерений и общие требования. 2. ГОСТ 8.586.2342005 (ISO 5167-2:2003). Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч. 2. Диафрагмы. Технические требования. 3. ГОСТ 8.586.3342005 (ISO 5167-3:2003). Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч. 3. Сопла и сопла Вентури.

*Технические требования. 4. ГОСТ 8.586.4-2005 (ИСО 5167-4:2003). Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч. 4. Трубы Вентури. Технические требования. 5. ГОСТ 8.586.5-2005 (ИСО 5167). Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч. 5. Методика выполнения измерений. 6. ДСТУ ГОСТ 8.586.1-2008 (ИСО 5167-1:2003). Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідин і газів за допомогою стандартних звужуючих пристроїв. Ч. 1. Принцип методу вимірювання та загальні положення. 7. ДСТУ ГОСТ 8.586.2-2008 (ИСО 5167-2:2003). Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідин і газів за допомогою стандартних звужуючих пристроїв. Ч. 2. Діафрагми. Технічні вимоги. 8. ДСТУ ГОСТ 8.586.3-2008 (ИСО 5167-3:2003). Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідин і газів за допомогою стандартних звужуючих пристроїв. Ч. 3. Сопла і сопла Вентурі. Технічні вимоги. 9. ДСТУ ГОСТ 8.586.4-2008 (ИСО 5167-4:2003). Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідин і газів за допомогою стандартних звужуючих пристроїв. Ч. 4. Труби Вентурі. Технічні вимоги. 10. ДСТУ ГОСТ 8.586.5-2008 (ИСО 5167). Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідин і газів за допомогою стандартних звужуючих пристроїв. Ч. 5. Методика виконання вимірювань. 11. Закон України "Про метрологію та метрологічну діяльність". 1998. 12. РД 50-213-80 Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. – М.: Изд-во стандартов, 1982. 13. ГОСТ 8.563.1-97 ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Диафрагмы, сопла ИСА 1932 и трубы Вентури, установленные в заполненных трубопроводах круглого сечения. Технические условия. 14. ГОСТ 8.563.2-97 ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Методика выполнения измерений с помощью сужающих устройств. 15. ГОСТ 8.563.3-97 ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Процедура и модуль расчетов. Программное обеспечение. 16. Пістун Є. П., Лесовой Л. В. Стан та особливості нормування витрати та кількості газів та рідин методом змінного перепаду тиску. Методи та прилади контролю якості, №13. – Івано-Франківськ: Вид-во Ів.-Франківськ. держ. техн. ун-ту нафти і газу, 2005. – С. 47–50.*