

УДК 681.121

Л.А. Витвицька<sup>1</sup>, З.Я. Витвицький<sup>2</sup>, Х.З. Лаврук<sup>2</sup><sup>1</sup> Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ<sup>2</sup> Івано-Франківський національний медичний університет, Івано-Франківськ

## МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ДВОФАЗОВИХ ПОТОКІВ

Запропоновано використання витратомірів постійного перепаду тиску для визначення витрат окремих фаз газорідних потоків. Описаний пристрій, до складу якого входять ротаметр та турбінний швидкісний лічильник, який дозволяє за вимірними значеннями швидкості та витрати потоку, а також за відомими значеннями густин фаз розрахувати витрати кожної з них зокрема. Виконаний метрологічний аналіз пристрою, який підтвердив достатньо високу його точність.

**Ключові слова:** ротаметр, постійний перепад тиску, двофазовий потік невизначеність.

### Вступ

Вимірювання витрати різних речовин необхідне у всіх галузях народного господарства. Дуже велике значення ці вимірювання мають для обліку енергоносіїв, у медичній діагностиці для проведення лабораторних і дослідних робіт, а також при вирішенні багатьох задач, які формуються сучасною наукою і технікою. До всіх приладів ставляться дві групи вимог. Перша група вимог: висока точність, надійність, незалежність результату вимірювання від зміни густини речовини, діапазон вимірювання. До другої групи вимог відносять: необхідність вимірювання витрати різноманітної номенклатури речовин при різних тисках і температурах. Висока точність – одна з основних вимог. Слід зазначити, що потоки рідини, газу або пари, які приймають як однофазні, насправді в багатьох випадках містять в тій чи іншій мірі домішки іншої фази. Так, разом із газом зазвичай рухається в невеликій кількості вода, яка конденсується при пониженні температури із водяної пари, яка утримується в газі. Водночас водяні потоки нерідко утримують захоплене цим потоком повітря.

Незважаючи на наявність значної кількості відомих і нових методів контролю газорідних потоків, існуючі в промисловості методи базуються на роздільному вимірюванні рідкої та газоподібної фази газоконденсатного потоку, інформація про фазовий склад потоку є не завжди вірогідною [1, 2]. Тому на сьогоднішній день розробка і створення ефективних засобів і методів контролю фазового складу і витрати двофазових газорідних потоків є актуальною проблемою.

**Метою роботи** є розроблення і метрологічне обґрунтування методики та пристрою для вимірювання витрати двофазових потоків.

### Виклад основного матеріалу

Запропонована методика та пристрій для вимірювання витрати двофазових потоків на основі методу постійного перепаду тиску із застосуванням

ротаметрів та турбінних лічильників. Переваги ротаметрів: простота конструкції і експлуатації; наглядність показів; надійність в роботі; можливість застосування для вимірювання малих витрат рідин і газів; значний діапазон вимірювання, можливість дистанційної реєстрації вимірювання [3].

Під вимірною ротаметром витратою газорідного потоку  $Q$  розуміють витрату:

$$Q = Q_p + Q_g, \quad (1)$$

де  $Q_p$  – витрата рідини;  $Q_g$  – витрата газу.

Відношення витрат обох фаз можна записати як відношення швидкостей цих фаз:

$$\frac{Q_g}{Q_p} = \frac{v_g}{v_p} = \frac{v \cdot \rho_g}{v \cdot \rho_p}, \quad (2)$$

де  $v_g$  – швидкість газу;  $v_p$  – швидкість рідини;  $v$  – загальна швидкість двофазового потоку.

Оскільки  $Q_g = Q - Q_p$ , підставивши цей вираз у рівняння (2) отримаємо:

$$\frac{Q - Q_p}{Q_p} = \frac{Q}{Q_p} - 1 = \frac{v \cdot \rho_g}{v \cdot \rho_p}. \quad (3)$$

З виразу (3) знаючи, що  $v \cdot \rho_p = Q_p$  отримаємо:

$$Q - Q_p = v \cdot \rho_g. \quad (4)$$

Знаючи загальну витрату потоку, швидкість потоку і густину газової фази, можна визначити витрату рідини:

$$Q_p = Q - v \cdot \rho_g. \quad (5)$$

Знаючи загальну витрату потоку, швидкість потоку і густину рідини можна визначити витрату газової фази:

$$Q_g = Q - v \cdot \rho_p. \quad (6)$$

У запропонованому пристрої дистанційно вимірюється величина лінійного переміщення тіла обтікання, отримується цифровий сигнал за допомогою сучасного диференціально-трансформаторного перетворювача. Пристрій складається із двох основних

блоків: блоку вимірювання витрати двофазового потоку і блоку обробки результатів вимірювання. Блок вимірювання, до складу якого входить ротаметр і турбінний вимірювач швидкості потоку, безпосередньо під'єднаний до трубопроводу. Ротаметр складається з конічної трубки невеликої конусності і поплавка з феромагнітного матеріалу. Турбінний вимірювач швидкості потоку з аксіальною турбінкою визначає загальну швидкість обох складових двофазового потоку, тобто загальну швидкість рідини і газу. Блок обробки результатів вимірювання складається з диференціально-трансформаторного перетворювача, перетворювача кількості обертів, мікропроцесорного блоку, блоку живлення і блоку індикації.

Потік газу, протікаючи через трубку ротаметра, спричиняє переміщення поплавка. Диференціально-трансформаторна система передачі сприймає механічне переміщення поплавка ротаметра і перетворює у електричний сигнал.

На зовнішню частину ротаметричної трубки намотані диференціально-трансформаторні котушки. У вторинний пристрій вмонтовано аналогічний трансформатор з осердям. Обмотки котушок ротаметра і вторинного приладу включені по диференційно-трансформаторній схемі. При живленні первинних обмоток диференційних трансформаторів змінною напругою у вторинних обмотках індуються змінні напруги, величина і фаза яких залежить від положення плунжерів в котушках. При неузгодженні положення плунжера напруги, індуквані у вторинних обмотках, стають різними. Ця напруга розбалансу приводить в рух асинхронний двигун, який переміщує осердя трансформатора вторинного пристрою, поки різниця напруг не стане рівною нулю. Таким чином, кожному положенню осердя трансформатора ротаметра, яке пропорційне величині витрати, відповідає певне положення осердя трансформатора вторинного пристрою і, як наслідок, певний цифровий сигнал на індикаторі.

Одночасно, перетворювач кількості обертів аксіальної турбіни здійснює перетворення обертів турбіни в електричний сигнал. Мікропроцесорний блок за допомогою мікросхеми AD698 здійснює цифрову обробку електричного сигналу. Живлення пристрою здійснюється від мережі змінного струму напругою 220 В за допомогою блоку живлення, який формує необхідні робочі напруги +15В і -15В. Блок живлення забезпечує живленням диференціально-трансформаторний перетворювач, перетворювач кількості обертів, мікропроцесорний блок і блок індикації.

Залежність опосередковано вимірюваної  $Q$  [3]:

$$Q = \beta \cdot f_k \sqrt{2p/\rho}, \quad (7)$$

де  $p$  – різниця статичних тисків на поверхні поплавка, що виникає внаслідок переходу частини потенціальної енергії в характерну швидкість потоку у вузькому перерізі;  $\beta = \mu / \sqrt{1 - \mu^2(m^2 - \xi_2)}$  коефіцієнт витрати,

приймає значення в межах  $0 \leq \beta \leq 1$ ;  $f_k$  – площа вузького кільцевого перерізу потоку між поплавком і конічною трубкою, де змінюється максимальна швидкість на рівні перерізу поплавка;  $m = f_k / f_{tr}$  – відносна площа кільцевого перерізу потоку,  $f_{tr}$  – площа перерізу потоку перед поплавком, де починається дія потоку на поплавок;  $\xi_2$  – коефіцієнт втрат, який залежить від сил тертя;  $\mu \geq 1$  – коефіцієнт звуження потоку, який залежить від сил інерції потоку, спільна дія  $\mu$  і  $\xi_2$  визначається числом Рейнольдса.

В даній формулі під густиною потоку  $\rho$  слід розуміти густину суміші двох фаз.

Густина суміші розраховується за формулою:

$$\rho = \alpha \cdot \rho_r + (1 - \alpha) \cdot \rho_p, \quad \alpha = A_r / A, \quad (8)$$

де  $A$  – загальний поперечний переріз, тобто сума площ перерізів, зайнятих газом ( $A_r$ ) і рідиною ( $A_p$ ), тобто  $A = A_r + A_p$ . Невизначеність коефіцієнта витрати з врахуванням некорельованості її складових визначається за формулою [4]:

$$U_\beta = k_p \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial \beta}{\partial \mu}\right)^2 \cdot u_\mu^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial m}\right)^2 \cdot u_m^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial \xi}\right)^2 \cdot u_\xi^2} = 0,000967; \quad (9)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial \mu} = \frac{\mu' \cdot (\sqrt{1 - \mu^2(m^2 - \xi)}) - \mu \cdot (\sqrt{1 - \mu^2(m^2 - \xi)})'}{(\sqrt{1 - \mu^2(m^2 - \xi)})^2} = 0,667.$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial m} = -\frac{\mu}{1 - \mu^2 m^2 + \mu^2 \xi} \cdot \frac{1}{2\sqrt{1 - \mu^2(m^2 - \xi)}} \cdot 2\mu^2 m = -0,467.$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial \xi} = -\frac{\mu}{1 - \mu^2 m^2 + \mu^2 \xi} \cdot \frac{1}{2\sqrt{1 - \mu^2(m^2 - \xi)}} \cdot \mu^2 = -0,333.$$

Значення невизначеності коефіцієнта звуження потоку  $u_\mu$  приймаємо рівним 0,1%, невизначеність відносної площі кільцевого перерізу потоку  $u_m$  становить 0,1% і невизначеність коефіцієнта втрат по тиску  $u_\xi$  рівна 0,1%.

Невизначеність густини двофазового потоку визначається за допомогою виразу [4]:

$$U_\rho = k_p \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial \rho}{\partial \rho_r}\right)^2 \cdot u_{\rho_r}^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial \rho_p}\right)^2 \cdot u_{\rho_p}^2} = 2,75 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \rho_r} = \alpha = 0,75, \quad \frac{\partial \rho}{\partial \rho_p} = (1 - \alpha) = 0,25, \quad \alpha = \frac{A_r}{A} = \frac{3}{4},$$

$$u_{\rho_r} = 0,01 \text{кг/м}^3, \quad u_{\rho_p} = 10 \text{кг/м}^3.$$

Невизначеність результату вимірювання для некорельованих складових:

$$U_Q = k_p \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial \beta}\right)^2 \cdot U_\beta^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial f_k}\right)^2 \cdot u_{f_k}^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial p}\right)^2 \cdot u_p^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial \rho}\right)^2 \cdot U_\rho^2} = 0,26 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \beta} = f_k \sqrt{2 \frac{p}{\rho}} = 36,473, \quad \frac{\partial Q}{\partial f_k} = \beta \sqrt{2 \frac{p}{\rho}} = 1,062,$$

$$\frac{\partial Q}{\partial p} = \frac{\beta}{2} \cdot f_k \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho \cdot p}} = 0,086,$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \rho} = -\frac{\beta}{2} \cdot f_k \cdot \frac{\sqrt{2p}}{\sqrt{\rho^3}} = -0,064,$$

$$p = 185,15 \text{ Па}, \quad \rho p = 1,8 \text{ Па}, \quad f_k = 0,000690 \text{ м}^2,$$

$$u f_k = 0,000001 \text{ м}^2.$$

Розраховану методичну невизначеність за формулою (11) приведемо до діапазону вимірювання для розрахунку відносної невизначеності:

$$U_Q = \frac{UQ}{60-10} = \frac{0,26}{50} = 0,005204 = 0,5204\%. \quad (12)$$

Джерела виникнення складових інструментальної невизначеності пов'язані з формою поплавка; викликані шорсткістю поверхні поплавка і ротаметричної трубки; диференціально-трансформаторної системи; блоку живлення; мікропроцесорного блоку; турбінного вимірювача швидкості потоку; перетворювача кількості обертів в електричний сигнал.

Складові інструментальної невизначеності доцільно визначати у відсотках.

Складність форми поплавка передбачає необхідність при його виготовленні дотримання точних розмірів. Циліндричність форми основного тіла поплавка визначає, що похибка недотримання геометричних розмірів визначається пресформою для виливання. Сучасний рівень верстатобудування дає можливість забезпечити невизначеність не вищу 0,01% від розміру поплавка. Недотримання конусності кінцевої частини поплавка може бути в межах 0,015% [2]. Шорсткість поверхні поплавка і ротаметричної трубки впливає на форму потоку газу, а також на неідентичність площини проходу газу між поплавком і трубкою. Для зменшення цього впливу необхідно забезпечити чистоту обробки поверхні поплавка не нижче 6,3 класу шорсткості. Оскільки ротаметрична трубка виготовлена зі скла, то шорсткість її поверхні є низькою, тому впливом даного фактору можна знехтувати. Приведена невизначеність складає 0,01% [2].

Невизначеність диференціально-трансформаторної системи передачі визначається гістерезисом в котушках. Для пристроїв, які серійно випускаються, складає 0,5% [3]. Мікропроцесорний блок, виготовлений на базі мікросхеми AD698, забезпечує стабільність характеристик, невизначеність складає

0,05% [1]. Невизначеність високостабілізованого блоку живлення, який виготовлений на новій елементній базі, є низькою і складає 0,05%. Невизначеність турбінного вимірювача швидкості потоку складає 0,01% [1], невизначеність перетворювача кількості обертів в електричний сигнал рівна 0,05%.

Визначаємо значення інструментальної невизначеності шляхом геометричного сумування:

$$U_I = \sqrt{0,01^2 + 0,015^2 + 0,01^2 + 0,5^2 + 0,05^2 + 0,05^2 + 0,01^2 + 0,05} = 0,559.$$

Тоді сумарна невизначеність пристрою для вимірювання витрати буде становити:

$$U_c = \sqrt{U_q^2 + U_i^2} = 0,776.$$

Визначаємо розширену невизначеність при допущенні нормального закону розподілу з коефіцієнтом охоплення  $k = 1,96$  при довірчій ймовірності  $\bar{P} = 0,95$ .

$$U = 1,96 \cdot 0,776 = 1,52\%.$$

## Висновки

Таким чином, ротаметри можуть бути використані для вимірювання витрати будь-яких середовищ. Встановлення ротаметра не потребує наявності прямої ділянки трубопроводу. Це дозволяє встановлювати прилади такого типу безпосередньо до і після згинів трубопроводів і вентилів. Втрати тиску на ротаметрах дуже малі. Прилади прості за конструктивним виконанням і містять малу кількість складових деталей. Невизначеності вимірювання не перевищують 1,5%, а при особливо точній калібровці можуть бути зменшені до 1%.

## Список літератури

1. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник / П.П. Кремлевский. – Л.: Машиностроение, 1989. – 701 с.
2. Каратаев Р.Н. Расходомеры постоянного перепада давления (ротаметры) / Р.Н. Каратаев, М.А. Копырин. – М.: Машиностроение, 1980. – 96 с.
3. Полищук С.С. Метрология та вимірювальна техніка: Підручник / С.С. Полищук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук. – Л.: Бескид Біт, 2003. – 220 с.
4. Захаров И.П. Теория неопределенности в измерениях / И.П. Захаров, В.Д. Кукуш. – Х.: Консум, 2002. – 256 с.

Надійшла до редколегії 15.10.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.П. Захаров, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

## МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ

Л.А. Витвицкая, З.Я. Витвицкий, К.З. Лаврук

Предложено использование расходомеров постоянного перепада давления для определения расходов отдельных фаз газожидкостных потоков. Описано устройство, в состав которого входят ротаметр и турбинный скоростной счетчик, которое позволяет по измеренным значениям скорости и расхода потока, и известным значениям плотностей фаз рассчитать расходы каждой из них в отдельности. Выполненный метрологический анализ устройства подтвердил достаточно высокую его точность.

**Ключевые слова:** ротаметр, постоянный перепад давления, двухфазный поток, неопределенность.

**METROLOGICAL ANALYSIS DEVICE FOR MEASURING THE TWO-PHASE FLOW**

L.A. Vitvitska, Z.Ya. Vitvitskij, K.Z. Lavruk

*Suggested uses constant differential pressure flow meters to determine the cost of the individual phases of gas-liquid flow. Apparatus is described, which comprises a turbine flowmeter and high-speed counter, which allows the measured values of the velocity and flow rate, and the known values of the densities of the phases to calculate the cost of each of them individually. Completion of metrological analysis device confirmed its relatively high accuracy*

**Keywords:** *rotameter, a constant pressure drop, two-phase flow, uncertainty.*