

УДК 681.121.089

**ВИЗНАЧЕННЯ ГУСТИНИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ЗВЕДЕНОЇ ДО СТАНДАРТНИХ УМОВ НА ПРОМИСЛОВИХ ВУЗЛАХ ОБМІНУ ГАЗУ****Я.М.Власюк<sup>1)</sup>, І.С.Кісіль<sup>2)</sup>**

1) – НАК «Нафтогаз України»

вул. Б.Хмельницького,6, м. Київ, 01001, e-mail: [Wlasyuk@naftagaz.net](mailto:Wlasyuk@naftagaz.net)2) – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул.Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, тел.: (03422) 460-77, e-mail: [zarichna@nung.edu.ua](mailto:zarichna@nung.edu.ua)

*Теоретично обґрунтована можливість визначення густини природного газу зведеної до стандартних умов по тиску і температурі на промислових вузлах обміну газу при послідовному з'єднанні сопла Вентурі і масового витратоміра газу. Приведені отримані аналітичні залежності, які описують взаємозв'язок густини природного газу зведеної до стандартних умов по тиску і температурі і параметрів сопла Вентурі та результатів вимірювання витрати газу масовим витратоміром, а також тиску і температури природного газу на вузлі обліку. Приведений зовнішній вигляд густиноміра, який реалізує запропоновану методику визначення густини природного газу безпосередньо в умовах промислових вузлів обміну газу.*

*Ключові слова: густина, природний газу, вимірювання, стандартні умови, сопло Вентурі, масовий витратомір, тиск, температура.*

*Теоретически обоснована возможность определения плотности природного газа, приведенной к стандартным условиям по давлению и температуре на промышленных узлах учета газа при последовательном соединении сопла Вентури и массового расходомера газа. Приведены полученные аналитические зависимости, описывающие взаимосвязь плотности природного газа, приведенной к стандартным условиям по давлению и температуре, и параметров сопла Вентури, а также и результатов измерения расхода газа массовым расходомером, давления и температуры природного газа на узле учета. Приведен внешний вид плотномера, реализующий предложенную методику определения плотности природного газа непосредственно в условиях промышленных узлов учета газа.*

*Ключевые слова: плотность, природный газ, измерение, стандартные условия, сопло Вентури, массовый расходомер, давление, температура.*

*It's proved theoretically possible to determine the density of natural gas, reduced to standard conditions of pressure and temperature on the industrial units of gas exchange when the nozzle Venturi and the mass gas flow gauge are connected in series. The analytical dependences that describe the relationship of density of natural gas, reduced to standard conditions of pressure and temperature, and the parameters of the Venturi nozzle and the measurement of gas flow rate by a mass gas flow gauge, also pressure and temperature of natural gas at the accounting unit. The characteristics of the gas density gauge applied for measurement of natural gas density directly on the industrial units of gas exchange are given.*

*Key words: density, natural gas, measurement, standard conditions, nozzle Venturi, mass gas flow gauge, pressure, temperature.*

При комерційному обліку природного газу актуальною є потреба безпосередньо на промислових вузлах обліку природного газу вимірювати густину газу приведену до стандартних умов по тиску і температурі, хоча цей реальний тиск і температура теж вимірюються. Слід відмітити, що на кожному із промислових вузлів обліку газу обліковується газ, який може поступати з різних джерел, він може мати різну густину, що впливає на об'єм цього газу в стандартних умовах, який

необхідний для комерційних розрахунків. Тому оперативне визначення густини природного газу зведеної до стандартних умов є актуальною задачею сьогодення.

Розглянемо процес, при якому вимірюваний газ послідовно проходить через два витратоміри: масовий, в якості якого використовується сопло Вентурі критичного витікання, та об'ємний, в якості якого використовується роторний або мембранний лічильники газу [1 ÷ 3].

Масова витрата газу, який проходить через сопло Вентурі, визначається за такою формулою [4]:

$$q_{M1} = ACC_R (p_0 \rho_0)^{1/2}, \quad (1)$$

де  $q_{M1}$  – масова витрата газу через сопло;  $A$  – площа поперечного перерізу горловини сопла;  $C$  – коефіцієнт витрати;  $C_R$  – коефіцієнт критичного витікання реального газу;  $p_0$  – абсолютний стагнаційний тиск газу на вході в сопло Вентурі;  $\rho_0$  – густина газу за стагнаційних умов на вході в сопло Вентурі.

Стагнаційні умови на вході в сопло Вентурі можуть визначатись із співвідношень: щодо абсолютного стагнаційного тиску:

$$p_0/p_1 = (1 + (\kappa - 1) Ma_1^2/2)^{\kappa/(\kappa - 1)}, \quad (2)$$

щодо абсолютної стагнаційної температури:

$$T_0/T_1 = 1 + (\kappa - 1) Ma_1^2/2, \quad (3)$$

де  $p_1$  і  $T_1$  – відповідно, абсолютний статичний тиск і абсолютна статична температура на вході в сопло Вентурі;  $\kappa$  – показник адиабати;  $Ma_1$  – число Маха за статичних умов на вході в сопло Вентурі.

Оскільки за критичного витікання газу із сопла Вентурі швидкість потоку газу в горловині сопла дорівнює місцевому значенню швидкості звуку, то значення числа Маха для статичних умов на вході сопла згідно з законом зберігання кількості газу буде обернено пропорційне співвідношенню площин поперечних розрізів трубопроводу вище по течії сопла та його горловини, тобто

$$Ma_1 = (\pi d^2/4) / (\pi D^2/4) = d^2/D^2, \quad (4)$$

де  $d$  і  $D$  – відповідно, діаметр горловини сопла і діаметр трубопроводу вище по течії від сопла Вентурі.

Враховуючи вираз (4) і той факт, що значення  $\kappa$  не може перевищувати 5/3, можна визначити, що за умови  $D \geq 10d$  різниця між стагнаційними та статичними умовами буде меншою від 0,0033 % і, з практичної точки зору, нею можна нехтувати. При цьому формула (1) прийме такий вигляд:

$$q_{M1} = ACC_R (p_1 \rho_1)^{1/2}, \quad (5)$$

де  $p_1$  – абсолютний статичний тиск газу на вході в сопло Вентурі;  $\rho_1$  – густина газу за статичних умов на вході в сопло Вентурі.

Густину  $\rho_1$  можна визначити за рівнянням стану [5] таким чином:

$$\rho_1 = \rho_C (p_1/p_C) (T_C/T_1) (Z_C/Z_1) = \rho_C C_1, \quad (6)$$

де  $\rho_C$ ,  $p_C$ ,  $T_C$  і  $Z_C$ , – відповідно, густина, абсолютний тиск, абсолютна температура і коефіцієнт стисливості газу, зведеного до стандартних умов;  $\rho_1$ ,  $p_1$ ,  $T_1$  і  $Z_1$  – відповідно,

густина, абсолютний тиск, абсолютна температура і коефіцієнт стисливості газу за статичних умов на вході в сопло Вентурі;  $C_1$  – коефіцієнт перетворення за статичних умов на вході в сопло Вентурі.

Таким чином, масова витрата газу через сопло Вентурі з урахуванням виразів (5) і (6) визначається за такою формулою:

$$q_{M1} = ACC_R (p_1 \rho_C C_1)^{1/2}. \quad (7)$$

Масова витрата газу, який проходить через лічильник, визначається за формулою [5]:

$$q_{M2} = \rho_C (p_2/p_C) (T_C/T_2) (Z_C/Z_2) = \rho_C q_2 C_2, \quad (8)$$

де  $q_{M2}$  – масова витрата газу через лічильник;  $q_2$  – об'ємна витрата газу за статичних умов на вході лічильника;  $p_2$ ,  $T_2$  і  $Z_2$ , – відповідно, абсолютний тиск, абсолютна температура і коефіцієнт стисливості газу за статичних умов на вході лічильника;  $C_2$  – коефіцієнт перетворення за статичних умов на вході лічильника.

Очевидно, що при послідовному з'єднанні сопла Вентурі і масового лічильника газу має місце рівність  $q_{M1} = q_{M2}$ . Тоді

$$ACC_R (p_1 \rho_C C_1)^{1/2} = \rho_C q_2 C_2. \quad (9)$$

Піднесемо обидві частини рівності (9) до квадрату та знайдемо густину газу зведеного до стандартних умов:

$$\rho_C = p_1 C_1 A^2 C^2 C_R^2 / (q_2^2 C_2^2). \quad (10)$$

Зовнішній вигляд густиноміра ОЕ-RO2, який реалізує вказану вище методику, зображений на рис. 1, а без передньої кришки – на рис. 2.

Всередині корпусу густиноміра ОЕ-RO2 (рис. 2) змонтовані вхідний трубопровід 2, регулятор тиску 3 з манометром 4, призначеним для візуального контролю тиску на вході густиноміра, фільтрів 5 та 6 відповідно для грубого (10 мкм) і тонкого (1 мкм) очищення, перетворювачі 7 і 8, відповідно, абсолютного тиску і температури газу на вході в сопло Вентурі критичного витікання 9, трубопровід 10 з виміральною ділянкою 11, перетворювачі 12 і 13, відповідно, абсолютного тиску та температури газу на вході лічильника газу 14, вихідний трубопровід 15 і перетворювач 18 вихідного цифрового сигналу густиноміра.

На передній кришці з внутрішньої сторони встановлений обчислювач, до якого кабелями приєднані перетворювачі 7 та 12 тиску, перетворювачі 8 та 13 температури, перетворювач 18 вихідного сигналу, імпульсний вихід лічильника 14 газу, розмикач 17 інтерфейсу RS232 і батарея 16 живлення. На зовнішній стороні передньої кришки встановлена лицьова панель з мембранною клавіатурою.

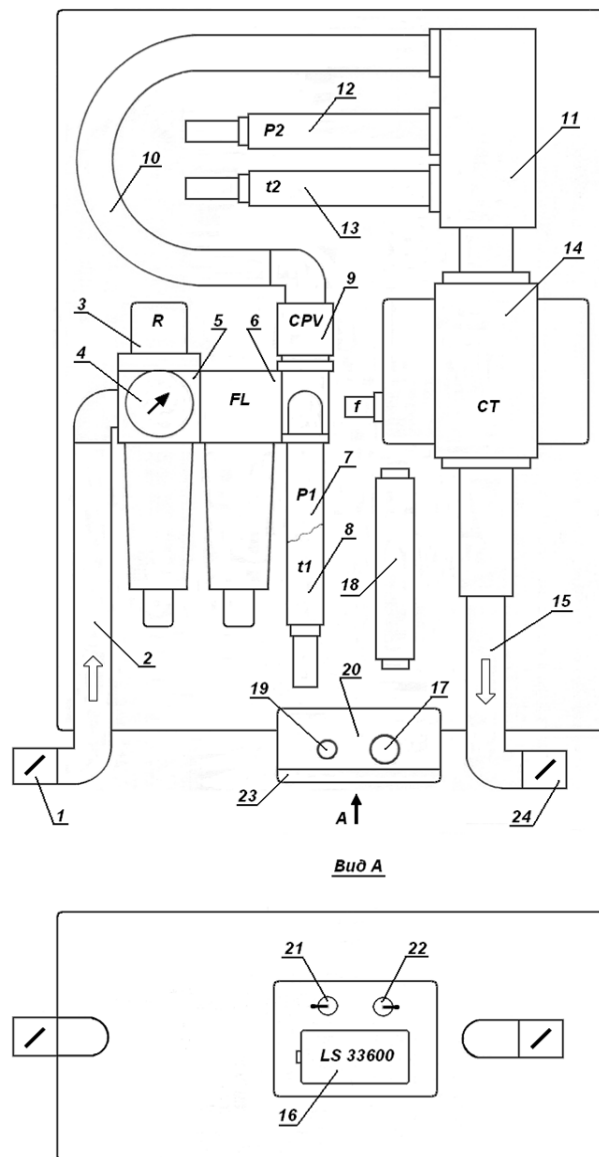


Рисунок 1 – Зовнішній вигляд густиніміра OE-RO2 (без передньої кришки)

В нижній частині корпусу густиніміра встановлено коробку 20 з розмикачем 17 інтерфейсу RS232, розмикачем 19 інтерфейсу RS485, літійовою батареєю 16 живлення та вимикачами 21 «Захист» і 22 «Живлення». Коробка 20 з зовнішньої сторони закривається кришкою 23.

Обчислювач неперервно обробляє імпульсні сигнали, які поступають від лічильника газу, щосекундно зчитує з відповідних перетворювачів значення тиску та температури газу на вході в сопло та на вході лічильника та обчислює за кожний період дискретизації значення густини газу за формулою (10).

Густина контролюваного газу при

послідовному з'єднанні двох вимірювальних пристроїв, один з яких сопло Вентурі, а другий – роторний лічильник газу також може бути визначена таким чином [2]:

$$\rho_c = \frac{A_{zp} P_1 K_{np1} \cdot 12,96 \cdot 10^6}{Q^2 K_{np2}}, \quad (11)$$

де  $A_{zp}$  – градувальний коефіцієнт сопла Вентурі;  $P_1$  – тиск газу перед соплом Вентурі;  $q$  – витрата газу, виміряна роторним лічильником газу;  $K_{np1}$ ,  $K_{np2}$  – коефіцієнти приведення до стандартних умов по соплу Вентурі і по лічильнику газу, відповідно, які розраховують так:

$$K_{np1} = \frac{P_1 T_{cm}}{T_1 P_{cm} K_1}, \quad (12)$$

$$K_{np} = \frac{P_2 T_{cm}}{T_2 P_{cm} K_2}, \quad (13)$$

де  $T_1$  – температура перепад соплом Вентурі;  $P_2$ ,  $T_2$  – тиск і температура перед роторним лічильником, відповідно;  $T_{cm}=293,15$  К і  $P_{cm}=101325$  Па;  $K_1$  – коефіцієнт стисливості газу.

Функціональна схема пристрою, який реалізує описану вище методику згідно (11) ÷ (13) визначення густини природного газу приведені до стандартних умов приведена на рис.3 і складається з трубопроводної системи подачі газу, що включає дві випробувальні ділянки – вхідний трубопровід високого/середнього тиску 1 та трубопровід середнього/низького тиску 2, перша із яких обладнана регулювальною апаратурою в складі клапана відсікача 3, фільтра і регулятора тиску 5, встановлених послідовно перед соплом Вентурі критичного витікання 6, що встановлене на стискуванні трубопроводів високого/середнього 1 і середнього/низького 2 тиску разом з засобами вимірювання тиску 10 і температури 11 на ділянці 15 трубопроводу 1 перед соплом Вентурі 6, а друга 2 обладнана роторним лічильником газу 7 з перетворювачем обертів ротора в імпульсні сигнали 8, коректором об'єму/об'ємної витрати газу 9 і засобами вимірювання тиску 12 і температури 13 на ділянці 16 трубопроводу 2 перед лічильником 7 та випускним краном 14, встановленим після лічильника 7. При цьому всі засоби вимірювання і регулювальна температура пов'язані з електронною інформаційно – вимірювально-керуючою системою 17 і разом з нею скомпоновані в переносній шафі/валізі 18, крім того вхідного трубопроводу високого/середнього

тиску 1 і вихід трубопроводу середнього/низького тиску 2 споряджені штуцерами 19 і 20, відповідно, для під'єднання пристрою гнучкими шлангами до діючого трубопроводу на місці вимірювання.



**Рисунок 2 – Фотографія потокового густиноміра OE-RO2**

Пристрій для здійснення способу вимірювання густини природного газу, який реалізує вищенаведену методику, працює наступним чином (рис. 2). Для здійснення вимірювань за допомогою штуцерів 19 і 20 під'єднують гнучкими шлангами пристрій до діючого трубопроводу подачі природного газу, де необхідно визначити густину газу. При цьому вхідний клапан-відсікач 3 і випускний кран 14 закриті. З підключенням приладу до газопровідної системи ЕОМ 17 дає команду на їх відкриття. При протіканні газу по трубопроводі високого або середнього тиску 1 тиск газу знижується до середнього або низького тиску, регулятором тиску 5 і, проходячи через сопло Вентурі 6, із вимірюванням тиску і температури приладами 10 і 11 та передачею показів на ЕОМ 17, поступає на другу випробувальну ділянку трубопроводу середнього/низького тиску 2, де вимірюють тиск і температуру газу засобами вимірювання 13 і 12, відповідно, об'єм/об'ємну витрату роторним лічильником 7, які за

допомогою перетворювача обертів ротора в імпульсні сигнали 8 поступають на ЕОМ 17.

Таким чином, газ проходить через два вимірювальні пристрої, один з яких сопло Вентурі 6, а другий – роторний лічильник газу 7 з перетворювачем швидкості обертання ротора в електричні імпульсні сигнали 8.

При протіканні газу через сопло Вентурі 6 останнє перетворює потік газу в критичний режим витікання, а при протіканні через лічильник газу 7 – в оберти роторів перетворювачем швидкості обертів ротора в імпульсні сигнали 8, при цьому необхідна об'ємна витрата і необхідний тиск газу забезпечуються регулятором тиску 5.

За допомогою інформаційно – вимірювально-керуючої системи 17 обчислюють значення густини природного газу в трубопроводі за стандартних умов з використанням математичної моделі шляхом ітерації результатів вимірювання об'єму/об'ємної витрати газу зведеної до стандартних умов двома методами з можливістю програмування ітераційної похибки і часу усереднення об'ємної витрати.

Після завершення вимірювань припиняється доступ газу із діючого газопроводу високого чи середнього тиску шляхом автоматичного спрацювання клапана-відсікача газу 3 за командою ЕОМ, одночасно стравлюються залишки газу з пристрою через випускний клапан 14 газопроводу, відповідно, середнього або низького тисків. Від'єднуються гнучкі шланги 19 і 20 і пристрій, завдяки компонованню у переносній шафі-валізі, готовий для переносного використання в іншому місці.

Пристрій також може бути використаний і для постійного режиму вимірювання густини газу.

## ВИСНОВКИ

В результаті проведених теоретичних досліджень доказана можливість визначення густини природного газу на вузлах промислового обліку, приведеної до стандартних умов по тиску ( $P_{ст}=101325$  Па) і температурі ( $T_{ст}=293,15$  К) шляхом послідовного з'єднання сопла Вентурі і масового витратоміра та вимірювання реальних тиску і температури газу.

Приведена фотографія густиноміра, що реалізує таку методику вимірювання густини природного газу, а також опис його принципу роботи. Такий густино мір встановлюється стаціонарно безпосередньо на промисловому вузлі обліку природного газу.

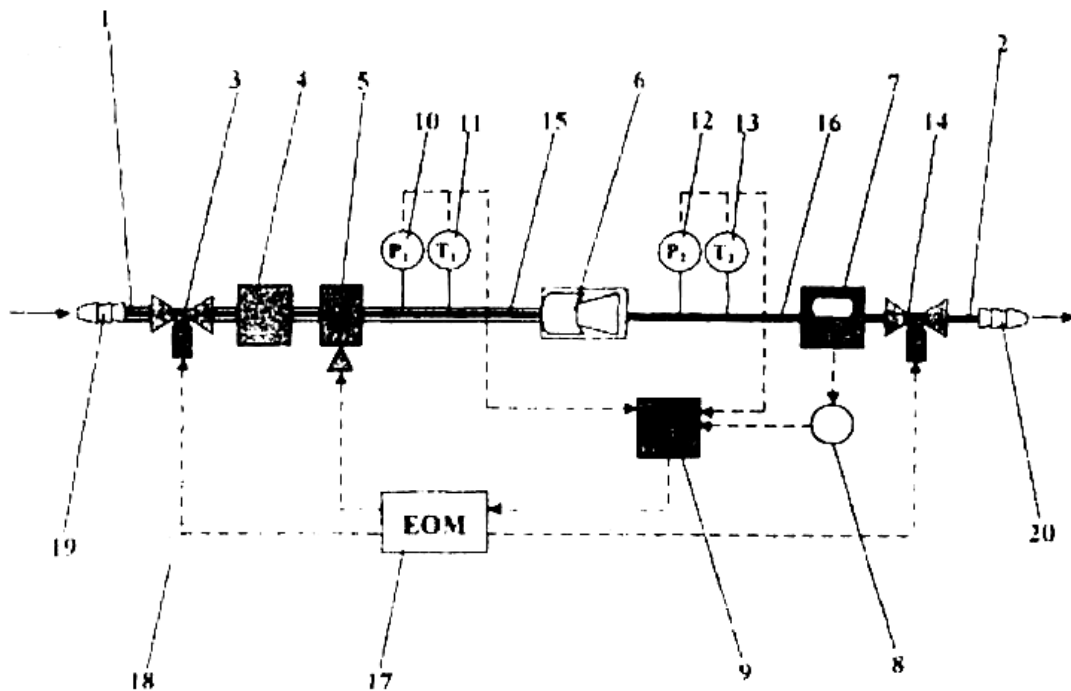


Рисунок 3 – Функціональна схема пристрою для вимірювання густини природного газу, приведеної до стандартних умов

Крім цього, приведена функціональна схема густини міра для визначення густини природного газу, зведеної до стандартних умов та аналітичної залежності, що описують методику визначення такої густини цим густиноміром.

1. Патент на корисну модель №39467. «Пристрій для вимірювання густини природного газу»: [Текст] / Купчак В. Р., Власюк Я. М., Цьомик В. П., Прудников Б. І., Бестелесний А. Г., Коляджин І. М., Середюк О. Є.; Заявл. – 13.10.2008. Опубл. – 25.02.2009. – Бюл. №4.  
2. Власюк Я. М. Густиномір газовий ОЕ R02: [Текст] / Власюк Я. М., Прудников Б. І., Цьомик В. П. н/т конференція «Приладобудування – 2010», м. Київ, 2010. – С. 259. 3. Патент на

корисну модель №56150. «Спосіб вимірювання густини газу»: [Текст] / Прудников Б. І., Цьомин В. П., Власюк Я. М., Бестелесний А. Г., Коляджин І. М., Слетцова Н. Є.; Заявл. – 02.04.2010. Опубл. – 10.01.2011. – Бюл. №1. 4. EN ISO 9300:2005 Измерение газового потока с помощью трубок Вентури с критическим расходом. – 2005. – 44с. 5. Облік природного газу: довідник / М. П. Андрійшин, О. М. Карпаш, О. Є. Середюк [та ін.]; за ред. С. А. Чеховського. – Івано-Франківськ: ПП «Сімик», 2008. – 180с.

Поступила в редакцію 02.11.2012р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук,  
проф. Середюк О. Є.