

УДК681.121.84

ЗАСТОСУВАННЯ УСЕРЕДНЮВАЛЬНИХ НАПІРНИХ ТРУБОК ЗА ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ТА ВИТРАТИ ГАЗУ

**Application of Averaging Multi-Hole Pressure Probes
in Gas Flow Velocity
and Volume Gas Flowrate Measurements**

А. Івашченко, начальник відділу,
П. Микитчик, провідний інженер,
В. Гайдай, провідний інженер,
ДП «Укрметртестстандарт», м. Київ,
М. Свита, головний інженер,
В. Купчинський, інженер-електронік,
НВФ «Проба», м. Київ,
e-mail: ukrcsm@ukrcsm.kiev.ua

A. Ivashchenko, Head of Department,
P. Mykytchik, Senior Engineer,
V. Gaidai, Senior Engineer,
SE «Ukrmetrteststandard», Kyiv,
M. Svyta, Chief Engineer,
V. Kupchynskii, electronics engineer
Research and production center «Proba», Kyiv,
e-mail: ukrcsm@ukrcsm.kiev.ua

Розглянуто алгоритми вимірювань та представлено результати експериментальних досліджень за застосування усереднювальних напірних трубок під час вимірювання швидкості та витрати газу.

Paper presents algorithms and corresponding formulas for calculating velocity and volume flowrate of gas when applying averaging multi-hole pressure probes. The characteristics of different multi-hole pressure probes and meters are presented.

Ключові слова: вимірювання, витрата газу, швидкість потоку, напірна трубка, трубка Піто.
Keywords: measurements, flowrate, flow velocity, Multi-Hole Pressure Probe, Pitot tube.

Використання усереднювальних напірних трубок за вимірювання витрат газу останніми роками набуло значного поширення у зв'язку із простою їх використання, невеликою складністю в процесі монтажу, а також із високою точністю вимірювань. Мініатюризація перетворювачів тиску призвела до виробництва великої кількості переносних та стаціонарних вимірювачів швидкості та витрати газів, які використовують усереднювальні напірні трубки. Принцип дії вимірювачів швидкості та витрати газу засновано на вимірюванні змінного перепаду тиску між повним динамічним тиском та статичним тиском, що утворюються в напірній трубці.

Конструктивне виконання усереднювальних напірних трубок може бути різним. У поперечному перерізі напірні трубки можуть мати форму кола, прямокутника, ромба, з гострими бічними гранями і заокругленими переднім і заднім краями.

У трубках розташовані отвори, спрямовані проти течії і за течією середовища, число яких залежить від діаметра трубопроводу, в якому вимірюється витрата. Отвори, спрямовані проти течії середовища,

сприймають тиск швидкісного напору середовища, тобто підвищений тиск; отвори, спрямовані за течією середовища, сприймають тиск розрядження, тобто знижений тиск.

Окрім зазначених усереднювальних трубок, застосовуються щілинні усереднювальні напірні трубки, які мають щілину (паз) за всією довжиною трубки; підвищений тиск сприймають усією площею щілини, а знижений тиск — трубкою, встановленою на стінку трубопроводу, в якому вимірюється витрата.

Значною перевагою усереднювальних напірних трубок є вимірювання середньої швидкості газового потоку за всім перетином газоходу. При цьому немає потреби переставляти вимірювальні первинні перетворювачі у різні точки перетину газоходу, як указано в [1].

Принцип роботи усереднювальної напірної трубки представлено на рис. 1.

Формула для визначення швидкості V , м/с, має такий вид:

$$V = \sqrt{2g \cdot \Delta P \cdot K_{T1} / \rho}, \quad (1)$$

де ΔP — динамічний тиск, який створюється газовим потоком на виході напірної трубки, мм вод. ст.;

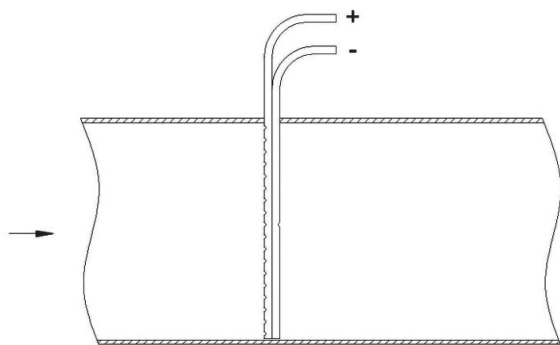


Рис. 1. Принцип дії усереднювальної напірної трубки
Fig. 1. Principle of operation of the averaging multi-hole pressure probe

K_{T1} — коефіцієнт напірної трубки, безрозмірна величина; ρ — щільність газу за робочих умов, $\text{кг}/\text{м}^3$; $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$.

Формула (1) традиційно використовується в Україні, вона відповідає [1], але у країнах Західної Європи та Америки використовується формула:

$$V = K_{T2} \sqrt{2g \cdot \Delta P / \rho}, \quad (2)$$

де K_{T2} — коефіцієнт напірної трубки, безрозмірна величина.

У зв'язку із цим справедливе співвідношення:

$$K_{T2} = \sqrt{K_{T1}}. \quad (3)$$

Щільність повітря (або газової суміші з близькою до повітря щільністю) за робочих умов (реальних умов експлуатації) ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$, розраховується за формулою:

$$\rho = 0,3593 \cdot \rho_N \cdot (P_{ATM} + P_{CT}) / (273 + t), \quad (4)$$

де P_{ATM} — атмосферний тиск повітря, мм рт. ст.; ρ_N — щільність повітря за нормальних умов ($P = 760 \text{ мм рт. ст.}$, $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$), $\rho_N = 1,293 \text{ кг}/\text{м}^3$; P_{CT} — статичний тиск повітряного потоку, мм рт. ст.; t — температура потоку, $^\circ\text{C}$.

Формула розрахунку швидкості V , $\text{м}/\text{с}$, має такий вид:

$$V = \sqrt{\frac{2g \cdot \Delta P \cdot K_{T1}}{0,3593 \cdot \rho_N \cdot ((P_{ATM} + P_{CT}) / (273 + t))}}. \quad (5)$$

Формула для розрахунку об'ємної витрати Q , $\text{м}^3/\text{год}$:

$$Q = Vc \cdot S \cdot 3600, \quad (6)$$

де Vc — середня швидкість у перетині газоходу, $\text{м}/\text{с}$; S — площа перетину газоходу, м^2 .

Значення площі перетину вимірюється під час установлення напірних трубок вимірювачів об'ємної витрати у конкретний газохід та вводиться як константа до програми вимірювачів.

За малих швидкостей повітряних потоків (до $1 \text{ м}/\text{с}$) сили, зумовлені інерційністю повітря, малі порівняно із силами внутрішнього тертя [2]. Тобто, за малих швидкостей потоку, повітря плавно

обтікає пневмометричну трубку, а вихори на краях трубки утворюються слабо. Це викликає нестабільність зони низького тиску (статичного тиску) і нестабільність коефіцієнта напірної трубки на малих швидкостях.

Проведено розрахунок числа Рейнольдса для різних конструкцій трубок, щоби виявити можливу залежність стабільності коефіцієнта напірної трубки від цього коефіцієнта на різних швидкостях повітряного потоку. Коефіцієнт Рейнольдса Re , безрозмірна величина, розраховувався за формулою [2]:

$$Re = \rho \cdot L \cdot V / \eta, \quad (7)$$

де ρ — щільність повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$; L — характеристичний розмір, м ; V — швидкість повітря, $\text{м}/\text{с}$; η — динамічна в'язкість, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$.

Для визначення коефіцієнта Рейнольдса найчастіше використовують значення кінематичної в'язкості ν , $\text{м}^2/\text{с}$, яку розраховують за формулою:

$$\nu = \eta / \rho. \quad (8)$$

Тоді отримуємо формулу для числа Рейнольдса:

$$Re = L \cdot V / \nu. \quad (9)$$

Для повітря за температури $20 \text{ }^\circ\text{C}$ $\nu = 0,0000162 \text{ м}^2/\text{с}$.

Найбільше питань виникає під час визначення характеристичного розміру. Цей термін не є однозначним в аеродинаміці для всіх випадків. Уважається достатнім визначати характеристичний розмір для кожного конкретного експерименту. Один і той самий об'єкт може мати різні характеристичні розміри, залежно від цілей експерименту.

Значення характеристичного розміру в цих дослідженнях обиралося як еквівалентний діаметр перетину пневмометричної трубки, тобто діаметр кола, площа якого еквівалентна площі перетину пневмометричної трубки. Для напірних трубок, які більш витягнуті вздовж напрямку потоку (на кшталт крила літака або витягнутого ромба), характеристичний розмір приймався як довжина (велика діагональ) перетину трубки.

Серійно виготовляються сотні різних конструкцій напірних трубок. Перетини деяких із них представлено на рис. 2.

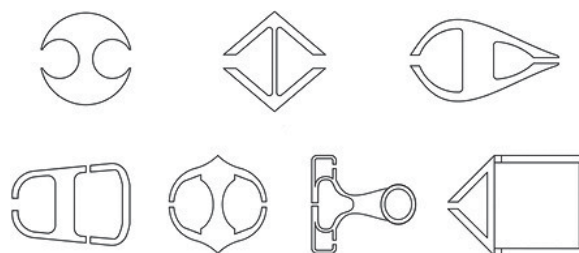


Рис. 2 Різні конструкції усереднювальних напірних трубок

Fig. 2. Different averaging multi-hole pressure probe designs

1. ПОРІВНЯННЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАПІРНИХ ТРУБОК РІЗНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Метою дослідження, проведеного на аеродинамічній трубці АТ «ПРОБА-25» (яка є власністю НВФ «ПРОБА») за допомогою приладу «Расход», було порівняння характеристик деяких із конструкцій напірних трубок. Обрано такі конструкції:

1.1. Ромбічна ТНУ-300 (рис. 3)

Дві трикутні трубки зі сторонами 7 мм, товщиною 1 мм спаяні між собою. Повний тиск сприймається 17 отворами діаметром 1 мм, відстань між отворами 17 мм. Статичний тиск сприймається одним отвором

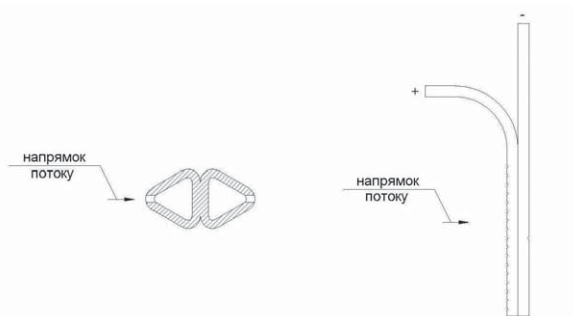


Рис. 3. Конструкція ромбічної ТНУ-300
Fig. 3. Rhombic TNU-300 design

діаметром 1 мм по центру трубки. Середній коефіцієнт напірної трубки $K_T = 0,6$; характеристичний розмір $L = 0,007352$ м.

1.2. Щілинна ТНУ-300 (рис. 4)

Кругла трубка діаметром 14 мм, товщиною 2 мм. Щілина товщиною 4 мм прорізана на довжину 270 мм. Повний тиск сприймається всією щілиною. Статичний тиск сприймається трубкою, встановленою на стінку трубопроводу. Середній коефіцієнт напірної трубки $K_T = 0,74$; характеристичний розмір $L = 0,014$ м.

1.3. Плоска ТНУ-300 (рис. 5)

Дві плоскі (овальні) трубки (10 x 3 x 1) мм спаяні між собою. Повний тиск сприймається 14 отворами діаметром 1 мм, відстань між отворами 20 мм.

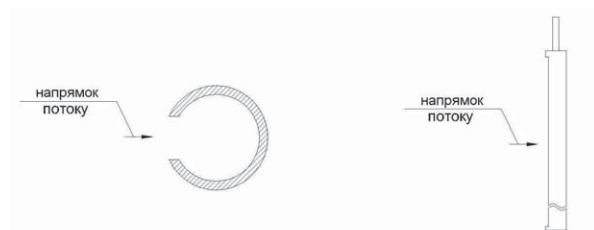


Рис. 4. Конструкція щілинної ТНУ-300
Fig. 4. Slotted TNU-300 design

Таблиця 1. Характеристики ромбічної напірної трубки ТНУ-300

Table 1. Rhombic TNU-300 characteristics

Середня швидкість в АТ «ПРОБА-25», м/с	Швидкість, вимірена приладом «Расход-1», м/с	Відносне відхилення коефіцієнта K_T , %	Re
1,94	1,92	1,03	880
4,87	4,84	0,62	2210
7,79	7,78	0,13	3535
9,77	9,78	0,10	4434

Таблиця 2. Характеристики щілинної напірної трубки ТНУ-300

Table 2. Slotted TNU-300 characteristics

Середня швидкість в АТ «ПРОБА-25», м/с	Швидкість, вимірена приладом «Расход-1», м/с	Відносне відхилення коефіцієнта K_T , %	Re
1,94	1,86	4,12	1676
4,87	4,79	1,64	4209
7,79	7,77	0,26	6732
9,77	9,82	0,51	8443

Таблиця 3. Характеристики плоскої напірної трубки ТНУ-300

Table 3. Flat TNU-300 characteristics

Середня швидкість в АТ «ПРОБА-25», м/с	Швидкість, вимірена приладом «Расход-1», м/с	Відносне відхилення коефіцієнта K_T , %	Re
1,94	1,91	1,55	1047
4,87	4,86	0,2	2628
7,79	7,78	0,13	4204
9,77	9,80	0,3	5272

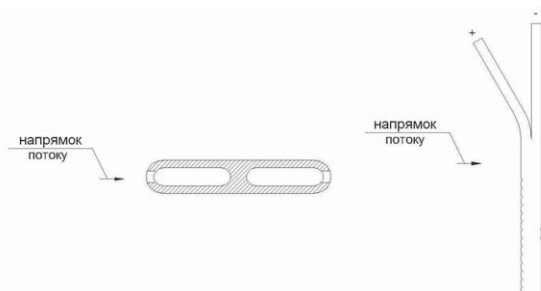


Рис. 5. Конструкція плоскої ТНУ-300
Fig. 5. Flat TNU-300 design

Статичний тиск сприймається двома отворами діаметром 1 мм по центру трубки, відстань між ними 20 мм. Середній коефіцієнт напірної трубки $K_T = 0,814$; характеристичний розмір $L = 0,008743$ м.

Підраховано, що в інтервалі діапазону швидкостей до 2 м/с число Рейнольдса для всіх трубок міститься в діапазоні від 880 до 1 700, а в діапазоні швидкостей понад 5 м/с число Рейнольдса міститься в діапазоні від 2 300 до 4 500.

Фахівці в галузі аеродинаміки вважають, якщо число Рейнольдса менше 2 300, — це зона ламінарної течії потоку; якщо понад 2 300 до 4 000, — це проміжний інтервал, а якщо число Рейнольдса вище 4 000 (інколи вважають, що вище 10 000), — то це зона турбулентної течії.

Перевірено гіпотезу, що збільшення числа Рейнольдса до 3 000 за мінімальної швидкості потоку призведе до того, що стабільний турбулентний потік виникатиме вже на малій швидкості потоку, і це призведе до стабільного коефіцієнта напірної трубки в усьому діапазоні швидкостей.

Однак гіпотеза щодо залежності стабільності коефіцієнта напірних трубок різних конструкцій від числа Рейнольдса не знайшла підтвердження. Виявилось, що найкращі результати отримано від напірних трубок, які витягнуті вздовж напрямку потоку та із однією зоною відриву вихорів, незалежно від числа Рейнольдса.

2. ЗАСТОСУВАННЯ НАПІРНИХ ТРУБОК У ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДАХ «РАСХОД», «РАСХОД-1»

Ці дослідження проведено з метою вибрати найкращу конструкцію напірної трубки для вимірювачів об'ємної витрати газу «РАСХОД» (рис. 6), «РАСХОД-1» (рис. 7), далі — вимірювачі, які реалізують вимірювання швидкості та витрати газових потоків за допомогою напірної трубки.

Вимірювачі об'ємної витрати газу складаються із вимірювального блока і напірної трубки. Конструктивно вимірювальний блок — це пласта-



Рис. 6. Зовнішній вид вимірювача «РАСХОД»
Fig. 6. «RASHOD» meter appearance



Рис. 7. Зовнішній вид вимірювача «РАСХОД-1»
Fig. 7. «RASHOD-1» meter appearance

совий корпус, в якому розміщено: електронну плату з графічним дисплеєм, кнопки управління й установлення нуля, акумуляторну батарею, роз'єм для підключення зарядного пристрою, два штуцери для підключення повного і статичного тиску газу від напірної трубки, роз'єм для підключення датчика температури. У ручці напірної трубки встановлено два штуцери для підключення повного і статичного тисків, а у внутрішньому об'ємі трубки розміщено датчик температури. Напірна трубка за допомогою силіконових трубок і кабеля з'єднується з вимірювальним блоком.

Вимірювачі забезпечують вимірювання швидкості та об'ємної витрати газу, приведені до стандартних умов.

Результати вимірювань швидкості та об'ємної витрати газу відображаються на графічному дисплеї.

Основні характеристики вимірювача «РАСХОД»:

- діапазон вимірювань швидкості газового потоку — (2...25) м/с;
- діапазон вимірювань об'ємної витрати газового потоку залежить від швидкості потоку та площини вимірювального перетину. Мінімальна об'ємна витрата 2,5 м³/с виникає за швидкості газового потоку 2 м/с та діаметра труби газоходу 20 мм;
- розширена невизначеність за вимірювання швидкості — 3 %;
- розширена невизначеність за вимірювання об'ємної витрати — 4 %;
- габаритні розміри вимірювального блока: (225 x 175 x 80) мм;
- маса вимірювального блока — 1,0 кг;
- живлення — від мережі змінного струму, номінальною напругою 220 В;
- максимальний надлишковий тиск у газоході — не більший за 100 кПа;
- температура газу в газоході: (мінус 20...300) °С;
- температура навколишнього повітря: (мінус 20...40) °С;
- вимірювач передає інформацію на зовнішні пристрої за допомогою інтерфейсу RS485 або радіо-каналу на частоті 433 МГц.


Основні характеристики вимірювача «РАСХОД-1»:

- * діапазон вимірювань швидкості газового потоку — (2...25) м/с;
- * розширена невизначеність за вимірювання швидкості — 3 %;
- * розширена невизначеність за вимірювання об'ємної витрати — 4 %;
- * габаритні розміри вимірювального блока: (215 x 92 x 36) мм;
- * маса вимірювального блока — 1,0 кг;
- * живлення — від акумуляторної батареї, номінальною напругою 4,2 В;
- * температура газу у газоході: (мінус 20...300) °С;
- * температура навколишнього повітря: (мінус 20...40) °С.

3. ВИСНОВКИ

Застосування усереднювальних напірних трубок за вимірювання швидкості та витрати газу має велику перспективу. Результати вимірювань характеристик різних напірних трубок свідчать щодо необхідності ретельної перевірки датчиків швидкості газу та вимірювальних приладів в аеродинамічних вимірювальних установках. Також встановлено, що стабільність коефіцієнта перетворення усереднювальної напірної трубки за зміни швидкості не залежить від числа Рейнольдса.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. ГОСТ 17.2.4.06-90 Охрана природы. Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения (GOST 17.2.4.06. Protection of nature. Atmosphere. Methods for determining the velocity and flowrate of gas-dust flows from stationary sources of pollution).
2. К.А. Путилов. Курс физики. Том 1. Механика. Акустика. Молекулярная физика. Термодинамика. Москва. ГИ ФМЛ (K.A. Putilov. Course of Physics. Volume 1. Mechanics. Acoustics. Molecular physics. Thermodynamics. Moscow. GI FML), 1963.
3. ISO 14164:1999 Stationary source emissions — Determination of the volume flowrate of gas streams in ducts — Automated method.
4. Даев Ж.А. Сравнительный анализ методов и средств измерения расхода газа. Уфимский государственный нефтяной технический университет, кафедра АПП, Нефтегазовое дело (Daev Zh.A. Comparative analysis of methods and gas flowrate meters. Ufa State Petroleum Technical University, Department of APP, Oil and Gas Business), 2009. 

Отримано / received: 08.09.2017.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н. Г.Ю. Народницьким (Україна).
D. Sc. (Techn.), G.Yu. Narodnytskyi, Ukraine, recommended this article to be published.