

М. П. СВИТА, Н. М. ЗАЩЕПКИНА

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ НАПІРНИХ ТРУБОК

Предметом дослідження в статті є напірні трубки, що служать датчиками для приладів, які вимірюють швидкість та витрату газів пневмометричним методом. **Мета** роботи - удосконалення методу знаходження коефіцієнтів напірних трубок для підвищення точності вимірювання швидкості та витрати газів. В статті вирішено **завдання** експериментального визначення коефіцієнтів точкових та усереднюючих напірних трубок в діапазоні швидкостей від 2 до 20 м/с. Розраховані середні коефіцієнти напірних трубок та похибка, що спричинена зміщенням орієнтації напірної трубки з вісі потоку на швидкості 10 м/с при середньому значенні коефіцієнта напірної трубки для трубок які досліджувались. У дослідженнях використані методи аналізу та синтезу, аналітичної та нарисної геометрії, теорії ймовірності, математичної статистики та чисельні методи з використанням комп'ютерних технологій. **Результати** роботи представлені у вигляді графічних залежностей коефіцієнту напірної трубки як функції швидкості газового потоку. Також показана графічна залежність швидкості потоку від кута повороту вісі напірної трубки відносно вісі потоку на швидкості 10 м/с при середньому значенні коефіцієнта напірної трубки для трубок, які брали участь у експерименті. **Висновки:** удосконалено метод для визначення коефіцієнтів як точкових так і усереднюючих напірних трубок. Виявлено, що у більшості трубок які досліджувались, коефіцієнт напірної трубки не стабільний в діапазоні швидкостей від 2 до 20 м/с. Таким чином, виникає додаткова похибка, яка спричинена нестабільністю коефіцієнта напірної трубки, так як коефіцієнт напірної трубки пропорційний швидкості газового потоку. Найбільш стабільні коефіцієнти мають трубки Піто та "ТНУ-8-6". Трубка Піто має середній коефіцієнт який дорівнює 1,009, стабільність коефіцієнту трубки відносно середнього значення склала $\pm 0,8\%$. Трубка "ТНУ-8-6" має середній коефіцієнт який дорівнює 0,6683, стабільність коефіцієнту трубки відносно середнього значення $\pm 1,3\%$. Також дані рекомендації щодо програмного забезпечення вимірювачів швидкості та витратомірів газів для зменшення інструментальної похибки.

Ключові слова: напірна трубка; пневмометричний метод; коефіцієнт трубки; швидкість; витрата.

Вступ

Одним із різновидів методу змінного перепаду тиску при вимірюванні швидкості та витрати газів є пневмометричний метод. За цим методом пневмометричні (напірні) трубки виступають датчиками для приладів, які вимірюють швидкість газового потоку. Принцип дії: динамічний тиск, який пропорційний швидкості газу виникає за рахунок набігаючого потоку, що обтікає напірну трубку. Динамічний тиск в напірній трубці розраховується як різниця між повним і статичним тиском.

Напірні трубки мають низку переваг перед "традиційними" рішеннями, які базуються на застосуванні звужуючих пристроїв (діафрагм), трубок Вентурі та ін. [1, 2, 3]. Напірні трубки утворюють значно менший опір в трубопроводі газовому потоку порівняно із звужуючими пристроями, що дозволяє зменшити втрати тиску при транспортуванні газу та заощадити енергоресурси [4]. Ще однією перевагою є простота виготовлення вимірювача швидкості та витрати газів на базі напірних трубок, його обслуговування і монтаж на об'єктах, можливість виготовлення напірної трубки для будь-яких діаметрів газоходу. Існує велика кількість модифікацій напірних трубок для різних умов застосування пов'язаних із температурою, статичним тиском та рівнями запиленості вимірюваного середовища.

Напірні трубки поділяють на точкові та усереднюючі. Точкові трубки – такі, що дають значення динамічного тиску в одній точці. Це дозволяє виміряти швидкість потоку газу в конкретній точці газоходу. Використовуючи коефіцієнт усереднення швидкості по перетину газоходу K_u при точковому вимірюванні можна розрахувати середню швидкість газового потоку [5]. Також, можна

розрахувати точку середньої швидкості в газоході та встановити в це місце точкову напірну трубку, таким чином отримати середнє значення швидкості потоку [6].

Усереднюючі трубки – дозволяють отримати середнє значення динамічного тиску усього поперечного перерізу газоходу, що дозволяє виміряти у ньому середню швидкість потоку. Знаючи середню швидкість газового потоку в газоході, розраховується об'ємна чи масова витрати газу [7].

Метрологічною характеристикою напірної трубки є її коефіцієнт K_t – безрозмірна величина, що характеризує відмінність між істинним динамічним тиском та таким його значенням, що сприймається напірною трубою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В відомих роботах по знаходженню коефіцієнтів напірних трубок [8, 9], коефіцієнт K розрахований через об'ємну витрату газу за допомогою механічних газових лічильників. Об'ємна витрата газу є добутком середньої швидкості газового потоку і площі поперечного перерізу газоходу, тому коефіцієнт K розрахований таким чином залежить від двох величин $K=f(K_t, K_u)$, а саме від коефіцієнту напірної трубки K_t і коефіцієнту усереднення швидкості газового потоку по перетину газоходу K_u . Тому в попередніх роботах коефіцієнт K винесений з під квадратного кореня формули знаходження швидкості газового потоку пневмометричним методом, що відповідає формулам які використовуються в країнах Європи та Америки [11]. Визначення коефіцієнтів усереднюючих напірних трубок можливе за даним методом, але такий підхід неприпустимий для визначення коефіцієнтів точкових напірних трубок, тому що

коефіцієнт розрахований таким чином буде залежати від конструктивних особливостей напірної трубки і характеру розподілення швидкостей по перетину газоходу відносно місця встановлення точкової напірної трубки. В даній роботі запропонований удосконалений метод знаходження коефіцієнтів точкових та усереднюючих напірних трубок за допомогою аеродинамічної труби (АТ) "Проба-25" та цифрових мановакууметрів серії "ММЦ", які зроблені та належить ТОВ "НВФ "ПРОБА".

Мета роботи. Удосконалення методу знаходження коефіцієнтів напірних трубок для підвищення точності вимірювання швидкості та витрати газів.

Таблиця 1. Технічні характеристики АТ "Проба-25"

Діапазон відтворення швидкості повітря, [м/с]	0,1-25
Абсолютна похибка, [м/с]	$\pm(0,05+0,015 \cdot V)$, де V – чисельне значення швидкості повітряного потоку, виражене в метрах за секунду.
Діаметр робочого перетину, [мм]	300

Таблиця 2. Технічні характеристики "ММЦ-200"

Діапазон вимірювання тиску/розрідження, [мм вод. ст.]	± 200
Межі основної абсолютної похибки, [мм вод. ст.]	$\pm(0,1+0,08 \cdot P)$, де P – чисельне значення вимірюваного тиску, виражене в [мм вод. ст.].
Ціна одиниці молодшого розряду відлікового пристрою, [мм вод. ст.]	0,1

Таблиця 3. Технічні характеристики вимірювача параметрів повітря "Атмосфера-1"

Діапазон вимірювання атмосферного тиску, [мм рт. ст.]	489 - 812
Абсолютна похибка вимірювання атмосферного тиску, [мм рт. ст.]	$\pm 0,8$
Ціна одиниці молодшого розряду відлікового пристрою вимірювання атмосферного тиску, [мм рт. ст.]	0,1
Діапазон вимірювання температури повітря, [°C]	+5 - +40
Абсолютна похибка вимірювання температури повітря, [°C]	$\pm 0,5$
Ціна одиниці молодшого розряду відлікового пристрою вимірювання температури повітря, [°C]	0,1

Прилад "ММЦ-20" був налаштований за допомогою прецизійного мікроманометра рідинного компенсаційного з мікрометричним гвинтом "МКВ-

250". Основні технічні характеристики приладу "МКВ-250" представлено у табл. 4.

Технічні характеристики мановакууметру "ММЦ-20" показані у табл. 5.

Таблиця 4. Технічні характеристики приладу "МКВ-250"

Межі вимірювання, [мм вод. ст.]	0-250
Межа похибки від верхньої межі вимірювання, не більше, [%]	0,02

Таблиця 5. Технічні характеристики "ММЦ-20"

Діапазон вимірювання тиску/розрідження, [мм вод. ст.]	± 20
Межі основної абсолютної похибки, [мм вод. ст.]	$\pm(0,03+0,08 \cdot P)$, де P – чисельне значення вимірюваного тиску, виражене в [мм вод. ст.].
Ціна одиниці молодшого розряду відлікового пристрою, [мм вод. ст.]	0,01

Математичний вираз для визначення коефіцієнту напірної трубки K_T , має вигляд, він отриманий з [10, 11]:

$$K_T = \frac{V^2 \rho_p}{2gP_d}, \quad (1)$$

де, V – швидкість потоку повітря створена АТ, [м/с]; ρ_p – щільність повітря в робочих умовах, [кг/м³]; g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81$ [м/с²]; P_d – динамічний тиск, який створюється потоком повітря в напірній трубці, [мм вод. ст.].

Щільність повітря в робочих умовах ρ_p визначається відповідно до виразу [12]:

$$\rho_p = \rho_n \frac{T_n P_p}{P_n T_p}, \quad (2)$$

де, ρ_n – щільність повітря за нормальних умов ($P = 760$ мм рт. ст., $t = 0$ °С) $\rho_n = 1,293$, [кг/м³]; T_n – температура в нормальних умовах, $T_n = 273,15$ [К]; T_p – температура в робочих умовах, [К]; P_n – тиск в нормальних умовах, $P_n = 760$ [мм рт. ст.]; P_p – тиск в робочих умовах, [мм рт. ст.].

Робоча формула для знаходження коефіцієнту K_T із врахуванням всіх констант, має вираз:

$$K_T = \frac{2369 \cdot 10^{-5} V^2 P_p}{P_d T_p}. \quad (3)$$

Суть методу полягає у розрахунку коефіцієнту напірної трубки K_T за виразом (3) на різних швидкостях потоку. Значення тиску в робочих умовах

P_p та температури в робочих умовах T_p вимірювались за допомогою приладу "Атмосфера-1". Динамічний тиск P_d вимірювався за допомогою приладів "ММЦ-200" та "ММЦ-20". В діапазоні вимірювань динамічного тиску до 20 мм вод. ст. застосовувався мановакууметр "ММЦ-20" із звуженим діапазоном вимірювань, а понад 20 мм вод. ст. використовувався прилад "ММЦ-200". Швидкість потоку повітря задавалась за допомогою АТ, вимірювання проводили на швидкостях 2, 5, 10, 15 та 20 м/с. Точкові напірні трубки встановлювали в центр перетину АТ, значення швидкості для розрахунку коефіцієнту напірної трубки зчитували з цифрового табло АТ. Для розрахунку коефіцієнтів усереднюючих напірних трубок використовували середню швидкість в АТ. Середня швидкість для АТ "Проба-25" розраховується як добуток швидкості на цифровому табло і коефіцієнту усереднення швидкості по перетину труби, який дорівнює 0,965. Усереднене значення коефіцієнту K_T визначалось як середнє арифметичне між максимальним і мінімальним значенням вимірів K_T .

Результати дослідження та їх обговорення

Для проведення експериментальних досліджень були виготовлені напірні трубки для точкового вимірювання швидкості газових потоків конструкцій Піто, НІОГАЗ та Проба. Їх конструкції представлені на рис. 1.

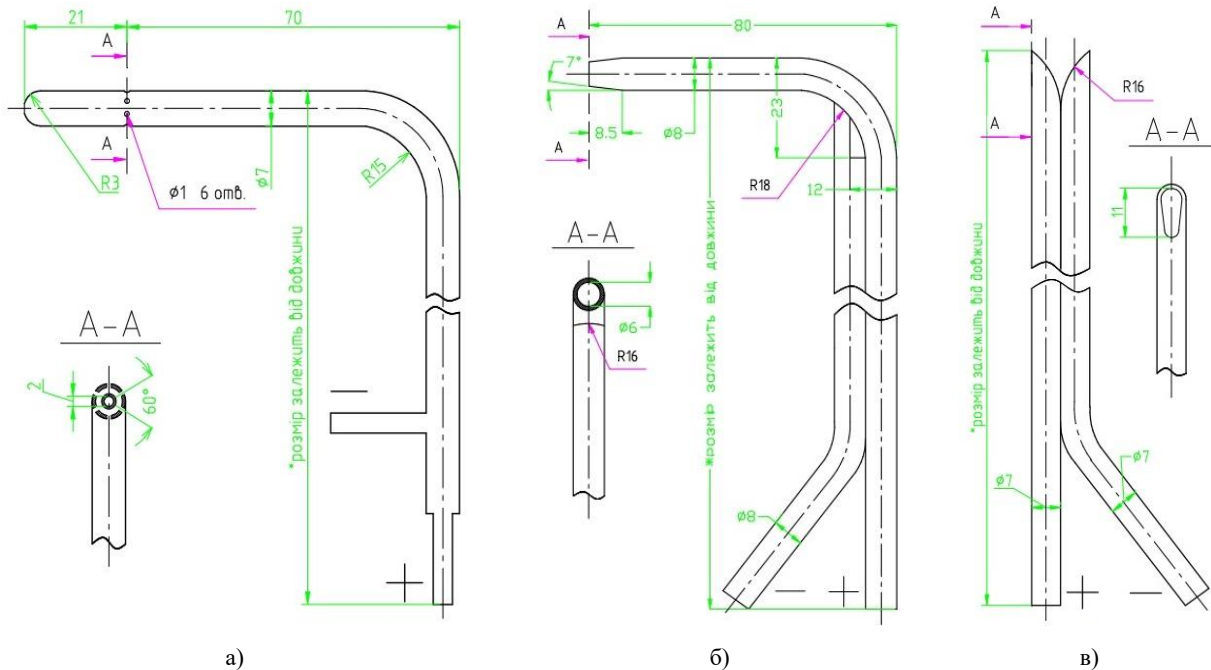


Рис. 1. Напірні трубки для точкового вимірювання швидкості газових потоків - а) конструкція Піто, б) конструкція НІОГАЗ, в) конструкція Проба

За конструктивними рішеннями – це з'єднані між собою строго заданим чином дві металеві трубки [13]. Через одну трубку на мікроманометр передається повний тиск газу (із знаком "+"), а через іншу трубку – статистичний тиск (із знаком "-"). Напірна трубка конструкції Піто (рис. 1, а) при проведенні неперервних вимірювань, застосовується при робочих температурах в газоході до 600°C та запиленості до 1 г/м³. При короткостроковому вимірюванні її можна застосовувати при запиленості газового потоку до 10 г/м³. Основна сфера застосування трубок даної конструкції при вимірюванні швидкості та

витрат газів – вентиляційні системи різного призначення.

Напірні трубки конструкцій НПОГАЗ та Проба (рис. 1, б, в) застосовуються при вимірюваннях швидкості газів в запиленних потоках, наприклад, в потоках, що відходять від стаціонарних джерел забруднення атмосфери. Температурний діапазон застосування трубок даних конструкцій становить до 800°C, запиленість потоку при неперервному вимірюванні до 5 г/м³, при періодичному до 50 г/м³.

Для проведення подальших вимірів були виготовлені експериментальні усереднюючі напірні трубки. Їх конструкції представлені на рис. 2.

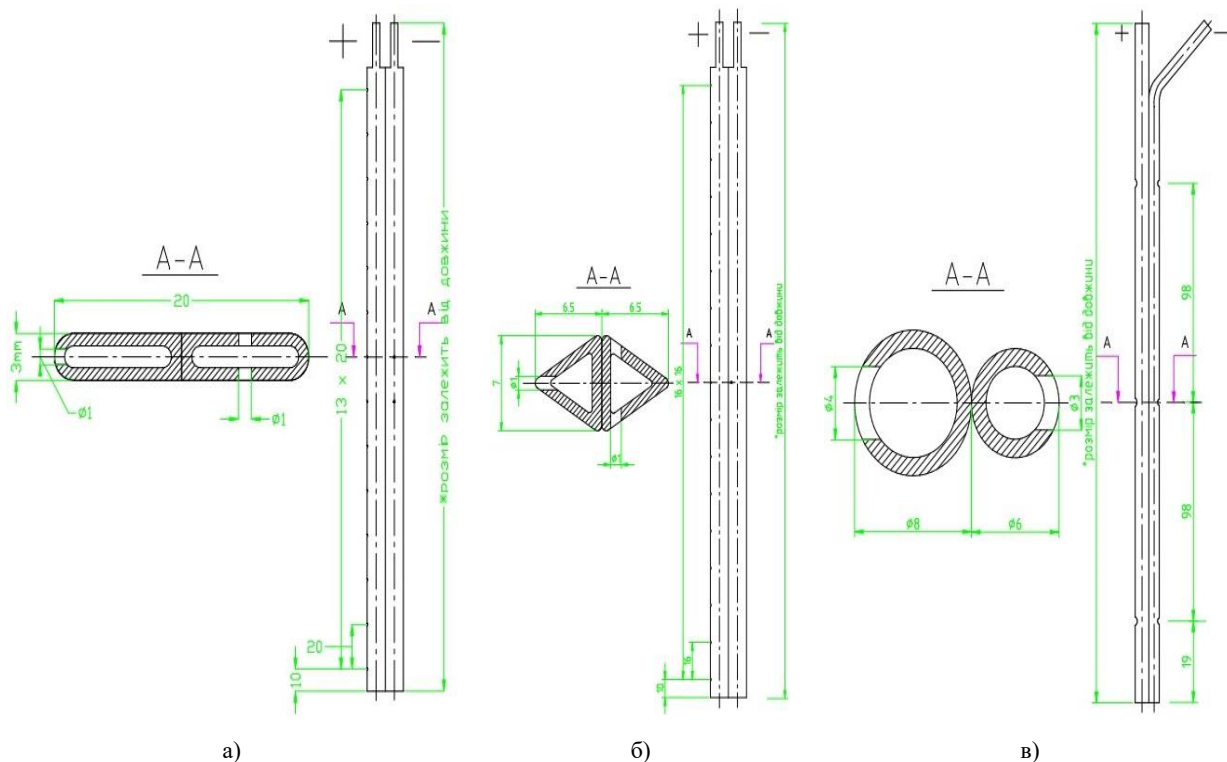


Рис. 2. Експериментальні усереднюючі напірні трубки – а) "ТНУ-плоска", б) "ТНУ-ромбічна", в) "ТНУ-8-6"

Усереднюючі напірні трубки мають по всій довжині кілька отворів для прийому повного тиску (із знаком "+") і декілька отворів для прийому статичного тиску (із знаком "-") [14, 15]. Результуючий повний та результуючий статичний тиск в усереднюючій напірній трубці утворюється як алгебраїчна сума всіх повних та статичних тисків кожного з приймаючих отворів [16].

Напірна трубка "ТНУ-плоска" (рис. 2, а) складається із двох плоских (овальних) трубок габаритних розмірів 10x3x1 мм спаяних між собою. Повний тиск сприймається 14 отворами діаметром 1 мм, при відстані між отворами 20 мм. Статичний тиск сприймається двома отворами на боковій грані напірної трубки діаметром 1 мм, що знаходиться по центру, відстань між якими складає 20 мм. Трубка "ТНУ-ромбічна" (рис.2, б) являє собою дві трикутні трубки зі сторонами 7 мм товщиною 1 мм спаяними між собою. Повний тиск сприймається 17 отворами діаметром 1 мм, відстань між отворами 16 мм. Статичний тиск сприймається двома отворами на

боковій грані діаметром 1 мм по центру трубки. Трубка "ТНУ-8-6" (рис.2, в) складається із двох круглих трубок діаметрами 8 і 6 мм, товщиною 1 мм спаяних між собою. Повний тиск сприймається 3 отворами, діаметром 4 мм, відстань між отворами 98 мм. Статичний тиск сприймається 3 отворами діаметром 3 мм, відстань між отворами також 98 мм.

Напірні трубки "ТНУ-плоска" та "ТНУ-ромбічна" можуть застосовуватися для вимірювання швидкостей та витрат чистих газів, тому що вони мають маленькі отвори для сприймання повного тиску газового потоку діаметром 1 мм. Трубка "ТНУ-8-6" може використовуватися в запиленних потоках – вона має великі отвори для сприймання повного тиску діаметром 4 мм.

Результати вимірювань коефіцієнтів K_T для точкових трубок різних конструкцій представлені на рис. 3. За результатами вимірювань показаних на (рис. 3–4) визначено межі зміни коефіцієнту K_T в діапазоні швидкостей газового потоку в газоході від 2 до 20 м/с.

Для напірної трубки конструкції Піто діапазон зміни середньому значенні 1,009. коефіцієнту K_T становив 1,017 – 1,0015 при

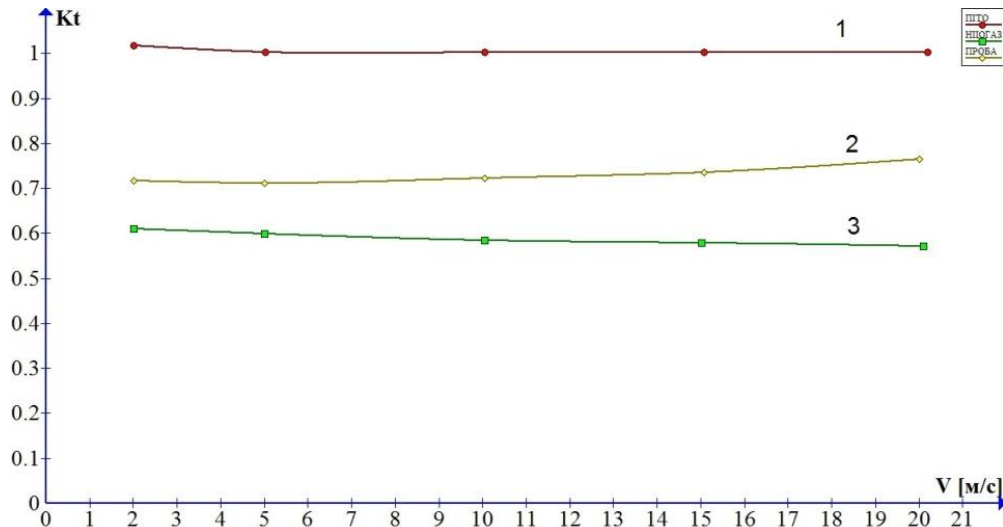


Рис. 3. Результати вимірювань коефіцієнтів для точкових напірних трубок. 1 - Піто, 2 – ПРОБА, 3 – НПОГАЗ

Для напірної трубки конструкції НПОГАЗ коефіцієнт K_T змінюється в діапазоні 0,6096 – 0,5721 при середньому значенні 0,5908. Для трубки конструкції ПРОБА діапазон зміни K_T становив 0,7647 – 0,7115, середнє значення 0,7381. Діапазон змін коефіцієнту K_T відносно його середнього значення

склав для трубки Піто $\pm 0,8\%$, для трубки НПОГАЗ $\pm 3,2\%$ та трубки ПРОБА $\pm 3,6\%$ відповідно.

Результати визначення коефіцієнтів K_T усереднюючих напірних трубок представлені на рис. 4.

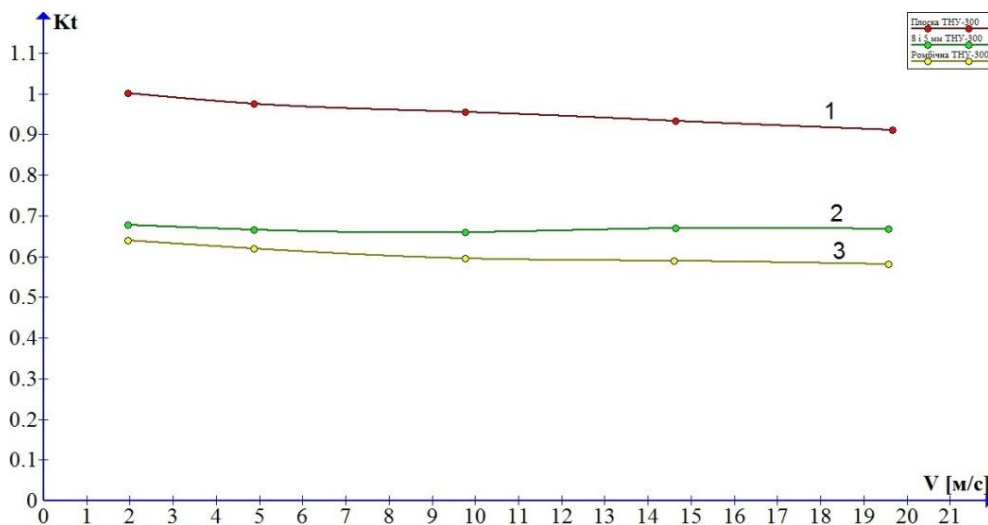


Рис. 4. Результати визначення коефіцієнтів K_T усереднюючих напірних трубок. 1 - "ТНУ – плоска", 2 - "ТНУ – 8-6", 3 - "ТНУ – ромбічна"

Для усереднюючої напірної трубки "ТНУ – плоска" діапазон зміни K_T становив 1,0002 – 0,9108, середнє значення 0,9555. Зміна коефіцієнту K_T відносно середнього значення склала $\pm 4,7\%$. Для напірної трубки "ТНУ-8-6" діапазон змін K_T становив 0,6766 – 0,66 при середньому значенні 0,6683. Зміна коефіцієнту K_T відносно середнього значення склала $\pm 1,3\%$. Для трубки конструкції "ТНУ – ромбічна" діапазон змін K_T склав 0,639 – 0,5818, середнє значення 0,6104. Коефіцієнт K_T відносно середнього значення змінювався в діапазоні $\pm 4,7\%$.

На (рис. 5–6) наведені результати визначення похибок вимірювання швидкості потоку повітря від зміщення орієнтації напірної трубки. Вимірювання проводили при фіксованій швидкості в АТ – 10 м/с та середніх значеннях коефіцієнту K_T для трубки певної конструкції. Напірні трубки були встановлені із кутом 0 кут. градусів відносно вісі потоку в газоході та зміщувалися в право і в ліво відповідно на ± 5 , ± 10 кут. градусів відносно центральної вісі газового потоку. Кут встановлення напірних трубок контролювався за допомогою геодезичного транспорту, похибка встановлення кутів склала ± 1 кут. градус.

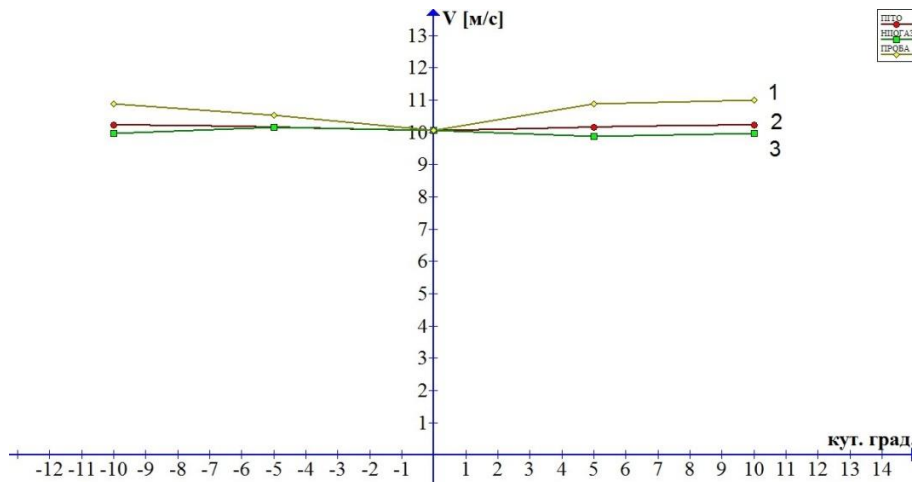


Рис. 5. Результати вимірювань швидкості потоку повітря в аеродинамічній трубці при змищенні орієнтації точкових напірних трубок. 1 – Проба, 2 – Піто, 3 – НПОГАЗ

З рис. 5 видно, що найменшу похибку при змищенні орієнтації з вісі потоку має напірна трубка конструкції Піто. Лінія значення похибки симетрична відносно позитивних та негативних кутів орієнтації при максимальному значенні похибки 1,6%. Напірні трубки конструкцій НПОГАЗ та Проба виявились більш чутливими до змищення орієнтації трубки

відносно вісі потоку, похибка не симетрична для позитивних та негативних кутів відхилення. Максимальна відносна похибка для трубки НПОГАЗ при змищенні +5 кутових градусів відносно центральної вісі потоку в газододі склала 2%. Максимальна відносна похибка для трубки Проба при змищенні в +10 кут. градусів становить 9%.

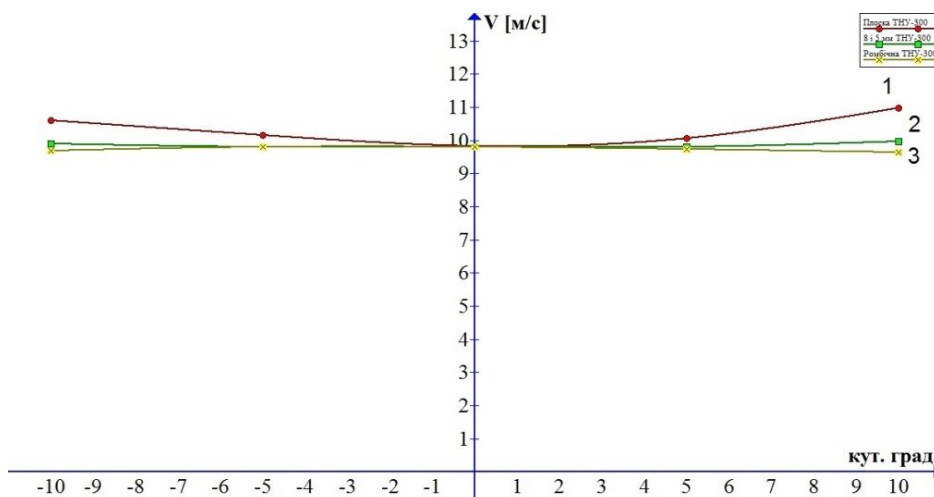


Рис. 6. Результати вимірювань швидкості потоку повітря в АТ при змищенні орієнтації експериментальних усереднюючих напірних трубок. 1 - "ТНУ – плоска", 2 - "ТНУ-8-6", 3 - "ТНУ – ромбічна"

Рис. 6 доводить, що експериментальні усереднюючі трубки мають майже симетричні характеристики відносно позитивних та негативних кутів при орієнтації відносно вісі газового потоку. Максимальна відносна похибка застосованих в експерименті усереднюючих трубок, а саме "ТНУ-8-6", "ТНУ – ромбічна" та "ТНУ-плоска" при куті відхилення відносно вісі газового потоку +10 кут. градусів становила 1,7%, 1,6% та 11,6% відповідно.

Пневмометричні трубки можуть бути виготовлені різними способами відповідно до конкретних умов застосування та містять широкий перелік конструктивних рішень. Коефіцієнт K_T напірної трубки пропорційний швидкості газового потоку, тому стабільність коефіцієнту в діапазоні

вимірювання важлива для більш точного вимірювання швидкості та витрати газів.

Коефіцієнт K_T вводиться як коригуюча константа у програмне забезпечення вимірювачів швидкості газового потоку та об'ємних витрат газів. Таким чином, при вимірюваннях присутня додаткова похибка спричинена нестабільністю коефіцієнту K_T при застосуванні напірних трубок із нестабільним коефіцієнтом. Знаючи характеристику напірної трубки $K_T = f(V)$ можна програмно змінювати коефіцієнт, таким чином, щоб мінімізувати інструментальну похибку спричинену нестабільністю коефіцієнту.

Точкові напірні трубки здебільшого використовуються при періодичному вимірюванні, що викликає додаткову інструментальну похибку при

зміщенні орієнтації напірної трубки відносно вісі газового потоку. Усереднюючі трубки використовують при неперервному вимірюванні, але вони також можуть бути встановлені з деяким кутом зміщення відносно центральної вісі газового потоку або сам потік може мати зміщення відносно центральної вісі напірної трубки.

Експериментально визначена додаткова похибка при зміщенні орієнтації напірної трубки з вісі потоку для точкових і усереднюючих трубок. Найбільш чутливими виявились трубки Проба та "ТНУ-плоска", їх похибки становлять відповідно 9% та 11,6% при відхиленні на +10 кут. градусів при швидкості газового потоку 10 м/с. Похибка при зміщенні орієнтації напірних трубок спричинена конструктивними особливостями та недосконалістю їх виготовлення. Таким чином, необхідно в технічних характеристиках пневмометричної трубки вказувати максимальний кут її відхилення від вісі газового потоку та намагатися встановлювати напірні трубки при вимірюванні якомога точніше за вісію потоку.

Серед виготовлених в рамках експериментальних досліджень напірних трубок найкращими характеристиками володіють точкова трубка Піто та усереднююча "ТНУ-8-6". Напірні трубки конструкції Піто та "ТНУ-8-6" мають більш стабільний коефіцієнт K_T в порівнянні з трубками своїх груп, а також меншу похибку спричинену відхиленням трубки від вісі газового потоку.

Головним недоліком при використанні напірних трубок є недостатня чутливість диференційних мікроманометрів при швидкостях газового потоку до 2 м/с. В той же час, розвиток нових технологій побудови диференційних датчиків тиску дає хороші перспективи застосування напірних трубок при вимірюванні швидкостей газових потоків, що становлять менше 2 м/с. Виявлено, що зі збільшенням коефіцієнту K_T зменшується динамічний тиск напірної трубки, який вона створює. Таким чином, напірні трубки НПОГАЗ та "ТНУ-ромбічна" створюють найбільший динамічний тиск.

Список літератури

1. ISO 5167-1:2003. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 1: General principles and requirements.
2. Harlan H., Bengtson P. Flow Measurement in Pipes and Ducts, An online, continuing education engineering course for 4 PDH credit. URL: <https://www.cedengineering.com/userfiles/Flow%20Measurement%20in%20Pipes%20and%20Ducts.pdf> (дата звернення: 23.04.2020).
3. Білинський Й. Й., Стасюк М. О., Гладивевський М. В. Аналіз методів і засобів контролю витрат рідких і газоподібних середовищ та їхня класифікація. *Наукові праці ВНТУ*. 2015, № 1.
4. Rosemount Annubar Flow Meter Series. URL: <https://www.emerson.com/documents/automation/flyer-rosemount-annubar-flowmeter-series-en-87398.pdf> (дата звернення: 23.04.2020).
5. ГОСТ 8.361-79. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Расход жидкости и газа. Методика выполнения измерений по скорости в одной точке сечения трубы. [Дата введения с 01.07.1980 г.], Государственный стандарт союза ССР.
6. Klopfenstein R. Jr. Air velocity and flow measurement using a Pitot tube. *ISA Transactions*. 1998. № 37 (4), P. 257–263. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0019-0578\(98\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0019-0578(98)00036-6)
7. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ : Справочник : Кн. 1. 5–е изд. перераб. и доп. СПб. : Политехника, 2002. 409 с.
8. Kabaciński M., Pospolita J. Experimental research into a new design of flow-averaging tube. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2011. № 22 (5) P. 421–427. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2011.06.006>
9. Дементьев С. Ю., Дементьев Ю. В. Експериментальне визначення коефіцієнта напірної трубки для контролю витрати газів. *Вісник Хмельницького Національного університету*. 2008. № 3. С. 56–58.

Висновки

Виготовлено експериментальні напірні трубки для вимірювання точкового і середнього динамічного тиску, який в свою чергу пропорційний швидкості газового потоку.

Запропоновано удосконалений метод для знаходження коефіцієнту K_T напірних трубок різних конструкцій. Експериментально визначені характеристики $K_T=f(V)$ в діапазоні швидкостей від 2 до 20 м/с. Виявлено, що у більшості трубок які досліджувались коефіцієнт не стабільний в діапазоні швидкостей від 2 до 20 м/с. Таким чином, виникає додаткова похибка, яка спричинена нестабільністю коефіцієнта K_T , так, як коефіцієнт K_T пропорційний швидкості потоку.

Визначено діапазон змін коефіцієнту та середній коефіцієнт K_T для точкових напірних трубок Піто, НПОГАЗ, Проба та усереднюючих напірних трубок "ТНУ-плоска", "ТНУ-8-6", "ТНУ-ромбічна". Найбільш стабільними характеристиками мають трубки Піто та "ТНУ-8-6". Трубка Піто має середній $K_T = 1,009$, стабільність коефіцієнту трубки відносно середнього значення склала $\pm 0,8\%$. Трубка "ТНУ-8-6" має середній $K_T = 0,6683$, стабільність коефіцієнту трубки відносно середнього значення $\pm 1,3\%$.

Експериментально визначено похибки при зміщенні орієнтації напірної трубки з вісі газового потоку для трубок на швидкості 10 м/с.

За результатами експерименту, рекомендовано характеристику напірної трубки $K_T=f(V)$ внести до програмного забезпечення вимірювача та автоматично змінювати коефіцієнт K_T в залежності від вимірюваної швидкості для зменшення інструментальної похибки спричиненої нестабільністю коефіцієнту K_T .

10. ГОСТ 17.2.4.06-90. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения. [Дата введения с 01.01.1991 г.]. Межгосударственный стандарт.
11. Івашченко А., Микитчик П., Гайдай В. та ін. Застосування усереднювальних напірних трубок за вимірювання швидкості та витрати газу. *Метрологія та прилади*. 2018. № 1. С. 26–30.
12. Стаскевич Н. Л., Северинец Г. Н., Вигдорчик Д. Я. Справочник по газоснабжению и использованию газа. Л. : Недра, 1990. 762 с.
13. ДСТУ 8725:2017. Якість повітря. Викиди стаціонарних джерел. Методи визначення швидкості та об'ємної витрати газопилових потоків. Київ ДП "УкрНДНЦ", 2018.
14. Kabacinski M., Lachowich C., Pospolita J. Numerical Analysis of Flow Averaging Tubes in the Vortex-Shedding Regime. *Archive of Mechanical Engineering*. 2013. № 60 (4) P. 283–297. DOI: <https://doi.org/10.2478/meceng-2013-0018>
15. Limin Zhang, Lijun Sun, Lixiao Qi. Experimental research of Averaging Pitot Tube Flow Sensors with Flow Conditioning Wing. *International Conference on Electric Information and Control Engineering. School of Electrical Engineering and Automation. Tianjin University. Tianjin Key Laboratory of Process Measurement and Control. Tianjin. China*. 2011. DOI: 10.1109/ICEICE.2011.5778019
16. Dobrowolski B., Kabacinski M., Pospolita J. A mathematical model of the self-averaging Pitot tube. A mathematical model of a flow sensor. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2005. № 16 (4), P. 251–265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2005.02.001>.

References

1. ISO 5167-1:2003. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 1: General principles and requirements.
2. Harlan, H., Bengtson, P. Flow Measurement in Pipes and Ducts, An online, continuing education engineering course for 4 PDH credit, available at: <https://www.cedengineering.com/userfiles/Flow%20Measurement%20in%20Pipes%20and%20Ducts.pdf> (last accessed 23.04.2020).
3. Bilynskiy, Y., Stasiuk, M., Hladyshevskiy, M. (2015), "Analysis of methods and means of cost control of liquid and gaseous media and their classification" ["Analiz metodiv i zasobiv kontroliu vytrat ridkykh i hazopodibnykh seredovnyshch ta yikhnia klasyfikatsiia"], *Scientific works of VNTU*, No. 1.
4. Rosemount Annubar Flow Meter Series, available at: <https://www.emerson.com/documents/automation/flyer-rosemount-annubar-flowmeter-series-en-87398.pdf> (last accessed 23.04.2020).
5. GOST 8.361-79. State system for ensuring the uniformity of measurements (GSI). The flow rate of liquid and gas. The methodology for measuring speed at one point in the pipe section. [Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy (GSI). Raskhod zhidkosti i gaza. Metodika vypolneniya izmereniy po skorosti v odnoy tochke secheniya truby.]
6. Klopfenstein, R. Jr. (1998), Air velocity and flow measurement using a Pitot tube. *ISA Transactions*. No 37(4) P. 257–263. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0019-0578\(98\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0019-0578(98)00036-6)
7. Kremlevskij, P. (2002), Flowmeters and counters of the amount of substances: Reference: Book. 1. 5th ed. reslave. and add. [Raskhodometry i schetchiki kolichestva veshchestv : Spravochnik : Kn. 1. 5–e izd. pererab. i dop.], St. Petersburg: Politehnichs, 409 p.
8. Kabacinski, M., Pospolita, J. (2011), "Experimental research into a new design of flow-averaging tube", *Flow Measurement and Instrumentation*, No. 22 (5), P. 421–427. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2011.06.006>
9. Dementyev, C., Dementyev, Y. (2008), "Experimental determination of the pressure tube coefficient for gas flow control" ["Eksperimentalne vyznachennia koefitsiienta napirnoi trubky dlia kontroliu vytraty haziv"], *Bulletin of Khmelnytsky National University*, No. 3, P. 56–58.
10. GOST 17.2.4.06-90. Protection of Nature. Atmosphere. Methods for determining the speed and flow rate of dust and gas streams emanating from stationary sources of pollution [Okhrana prirody. Atmosfera. Metody opredeleniya skorosti i raskhoda gazopylevykh potokov, otkhodyashchikh ot stacionarnykh istochnikov zagryazneniya].
11. Ivashchenko, A., Mykytchik, P., Gaidai, V., Svyta, M., Kupchinsky, V. (2018), "The use of averaging pressure tubes for measuring the speed and flow rate of gas" ["Zastosuvannya useredniuvalnykh napirnykh trubok za vymiruvannya shvydkosti ta vytraty hazu"], *Metrology and devices*, No. 1, P. 26–30.
12. Staskevich, N., Severinets, G., Vigdorchik, D. (1990), Handbook of gas supply and use of gas [Spravochnik po gazosnabzheniyu i ispol'zovaniyu gaza], Lviv, Nedra, 762 p.
13. DSTU 8725:2017. Air quality. Emissions from stationary sources. Methods for determining the velocity and flow rate of gas-dust streams. [Yakist povitria. Vykydy stacionarnykh dzherel. Metody vyznachennia shvydkosti ta obiemnoi vytraty hazopylovykh potokiv].
14. Kabacinski, M., Lachowich, C., Pospolita, J. (2013), "Numerical Analysis of Flow Averaging Tubes in the Vortex-Shedding Regime", *Archive of Mechanical Engineering*, Vol. 60 (4), P. 283–297. DOI: <https://doi.org/10.2478/meceng-2013-0018>
15. Limin, Z., Lijun S., Lixiao, Q. (2011), "Experimental research of Averaging Pitot Tube Flow Sensors with Flow Conditioning Wing", *International Conference on Electric Information and Control Engineering. School of Electrical Engineering and Automation. Tianjin University. Tianjin Key Laboratory of Process Measurement and Control. Tianjin. China*. DOI: 10.1109/ICEICE.2011.5778019.
16. Dobrowolski, B., Kabacinski, M., Pospolita, J. (2005), "A mathematical model of the self-averaging Pitot tube. A mathematical model of a flow sensor", *Flow Measurement and Instrumentation*. No. 16 (4), P. 251–265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2005.02.001>.

Надійшла (Received) 28.04.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Свита Максим Петрович – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, головний інженер ТОВ "НВФ "ПРОБА", Київ, Україна; email: max15s@ukr.net; ORCID: 0000-0003-0560-3620.

Свита Максим Петрович – Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", аспирант кафедры информационно-измерительных технологий, главный инженер ТОВ "НВФ "ПРОБА", Киев, Украина.

Svyta Maxim – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Graduate Student of the Department of Information Measuring Technologies, Chief Engineer of TOV "NVF" PROBA", Kiev, Ukraine.

Защепкіна Наталія Миколаївна – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Київ, Україна; email: nanic1604@gmail.com; ORCID: 0000-0001-9397-6632.

Защепкина Наталья Николаевна – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", профессор кафедры информационно-измерительных технологий, Киев, Украина.

Zaschepkina Natalia – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Professor of the Department of Information Measuring Technologies, Kyiv, Ukraine.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ НАПОРНЫХ ТРУБОК

Предметом исследования в статье является напорные трубки, служащие датчиками для приборов, измеряющих скорость и расход газов пневмометрическим методом. **Цель** работы – совершенствование метода определения коэффициентов напорных трубок для повышения точности измерения скорости и расхода газов. В статье решена **задача** экспериментального определения коэффициентов точечных и усредняющих напорных трубок в диапазоне скоростей от 2 до 20 м/с. Рассчитаны средние коэффициенты напорных трубок и погрешность, вызванная смещением ориентации напорной трубки с оси потока на скорости 10 м/с при среднем значении коэффициента напорной трубки. В исследованиях использованы методы анализа и синтеза, аналитической и начертательной геометрии, теории вероятностей, математической статистики и численные методы с использованием компьютерных технологий. **Результаты** работы представлены в виде графических зависимостей коэффициента напорной трубки как функции скорости газового потока. Также показана графическая зависимость скорости потока от угла поворота оси напорной трубки относительно оси потока на скорости 10 м/с при среднем значении коэффициента напорной трубки для трубок, участвовавших в эксперименте. **Выводы:** усовершенствован метод для определения коэффициентов как точечных, так и усредняющих напорных трубок. Выявлено, что в большинстве трубок, которые исследовались коэффициент напорной трубки не стабилен, в диапазоне скоростей от 2 до 20 м/с. Таким образом, возникает дополнительная погрешность, вызванная нестабильностью коэффициента напорной трубки, так как коэффициент напорной трубки пропорционален скорости газового потока. Наиболее стабильные коэффициенты имеют трубки Пито и "ТНУ-8-6". Трубка Пито имеет средний коэффициент равный 1,009, стабильность коэффициента трубки относительно среднего значения составила $\pm 0,8\%$. Трубка "ТНУ-8-6" имеет средний коэффициент равный 0,6683, стабильность коэффициента трубки относительно среднего значения $\pm 1,3\%$. Также даны рекомендации по программному обеспечению измерителей скорости и расходомеров газов для уменьшения инструментальной погрешности.

Ключевые слова: напорная трубка; пневмометрический метод; коэффициент трубки; скорость; расход.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF PRESSURE TUBES COEFFICIENTS

The **subject** of this research is pressure tubes, which serve as sensors for instruments measuring the velocity and flow rate of gases by the pneumometric method. The **purpose** of the work is to improve the method of determining the coefficients of pressure tubes in order to increase the accuracy of measuring the velocity and flow rate of gases. The article solves the **problem** of experimental determination of the coefficients of a point and averaging pressure tubes in the velocity range from 2 to 20 m/s. The average coefficients of the pressure tubes and the error caused by the displacement of the orientation of the pressure tube from the flow axis at a speed of 10 m/s were calculated at the average value of the coefficient of the pressure tube for the studied tubes. The studies used methods of analysis and synthesis, analytical and descriptive geometry, probability theory, mathematical statistics, and numerical methods using computer technology. The **results** of the work are presented in the form of graphical dependencies of the pressure tube coefficient as a function of gas flow rate. The graphical dependence of the flow velocity on the angle of rotation of the axis of the pressure tube relative to the axis of the flow at a speed of 10 m/s at the average value of the coefficient of the pressure tube for the tubes that participated in the experiment is also shown. **Conclusions:** the method for determining the coefficients of a point and averaging pressure tubes has been improved. It was found that in most of the investigated tubes, the pressure coefficient of the pressure tube is not stable at the velocity range from 2 to 20 m/s. Thus, an additional error arises due to the instability of the pressure tube coefficient, since the coefficient of the pressure tube is proportional to the gas flow rate. The most stable coefficients are Pitot tubes and TNU-8-6. The Pitot tube has an average coefficient of 1.009, the stability of the coefficient of the tube relative to the average value was $\pm 0.8\%$. The TNU-8-6 tube has an average coefficient of 0.6683, and the tube coefficient stability for the average value is $\pm 1.3\%$. Also included are recommendations for velocity meter software and gas flowmeters to reduce instrumental error.

Keywords: pressure tube; pneumometric method; tube coefficient; velocity; flow.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Свита М. П., Защепкіна Н. М. Експериментальне визначення коефіцієнтів напірних трубок. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 2 (12). С. 148–156. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.12.148>.

Svyta, M., Zaschepkina, N. (2020), "Experimental determination of pressure tubes coefficients", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (12), P. 148–156. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.12.148>.