

ДОДАТОК 6.А

(обов'язковий)

ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ПЕРЕПАДУ ТИСКУ

6.А.1 Суть методу перепаду тиску

Суть визначення швидкості в газі за допомогою вимірювання перепаду тиску описано в стандарті ISO 3966 [3]. Трубка Піто дозволяє визначити перепад тиску в області площини вимірювання. На рисунку 6.А.2 представлена принципова схема трубки Піто L-типу, хоча принципи роботи для всіх конструкцій трубки Піто однакові.

У потоці розташовані щонайменше два відведення для вимірювання тиску, одне з яких знаходиться під безпосередньою дією потоку та забезпечує вимірювання гальмування тиску, p_2 , а інше або кілька інших – вимірювання статичного тиску, p_3 . Відведення для вимірювання статичного тиску може складатися з кільця отворів навколо трубки Піто в конструкції L-типу або з одного отвору в конструкції S-типу. У трубках Піто 3D-типу можуть бути присутніми додаткові окремі відведення для вимірювання вектора потоку в трьох вимірах. Тиск у цих отворах передають через зонд трубки Піто на диференційний манометр, встановлений ззовні димової труби. У цій точці вимірюють різницю тисків. Вимірювання перепаду тиску можна проводити за допомогою цифрового манометра або ручного похилого рідинного манометра.

Формулу (6.А.1) використовують для визначення швидкості на основі перепаду тиску.

6.А.2 Вимірювальне устаткування

6.А.2.1 Трубки Піто

6.А.2.1.1 Трубка Піто L-типу

Це основний тип трубки Піто, що складається з трубки, спрямованої безпосередньо в потік рідини. Оскільки в ця трубка містить рідину, можна виміряти тиск. Рухома рідина зупиняється (пригальмовується), оскільки немає вихідного

отвору, що дозволяє продовжити потік. Це – тиск гальмування рідини, також відомий як загальний тиск або (зокрема в авіації) тиск Піто.

На рисунку 6.А.1 показаний принцип вимірювання за допомогою трубки Піто L-типу.

6.А.2.1.2 Трубка Піто S-типу

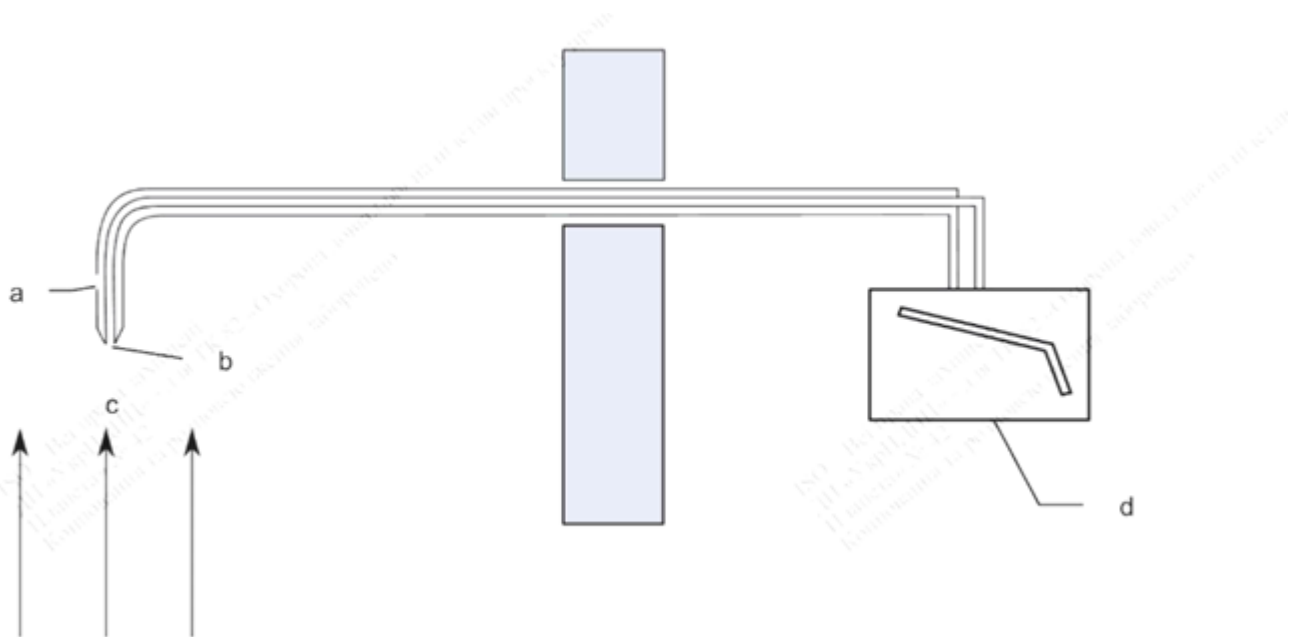
Це ще один основний тип трубки Піто, що дозволяє виконати вимірювання безпосередньо в потоці. Принцип роботи аналогічний принципу роботи трубки Піто L-типу. Швидкість обчислюють так само, як і для трубки Піто L-типу. Трубка Піто S-типу повинна бути відкалібрована за допомогою контрольного методу, оскільки виміряний «статичний» тиск не є реальним статичним тиском.

На рисунку 6.А.3 представлена принципова схема трубки Піто S-типу.

6.А.2.1.3 Трубка Піто 3D-типу

Цей тип зонда складається з п'яти відведень для вимірювання тиску у сферичній вимірювальній голівці (або призмоподібній вимірювальній голівці, яку не використовували в лабораторних випробуваннях). Відведення для вимірювання тиску пронумеровані від 1 до 5, а тиск, виміряний на кожному отворі, позначають як p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 відповідно.

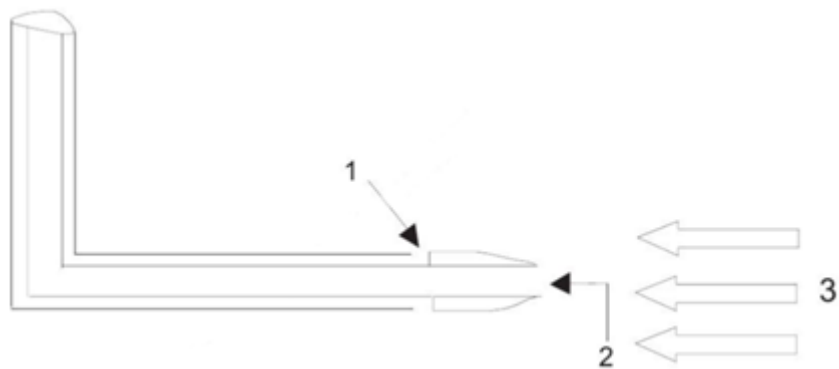
Перепад тиску $p_2 - p_3$ використовують для обнулення зонда та визначення кута ристання; перепад тиску $p_4 - p_5$ є функцією кута нахилу; а перепад тиску $p_1 - p_2$ є функцією повної швидкості. Типова сферична трубка Піто 3D-типу показана на рисунку 6.А.4.



Умовні позначки:

- | | | | |
|---|---------------------------------|---|---|
| a | p_3 — статичний тиск | c | v — потік |
| b | p_2 — точка тиску гальмування | d | Δp — вимірювання перепаду тиску |

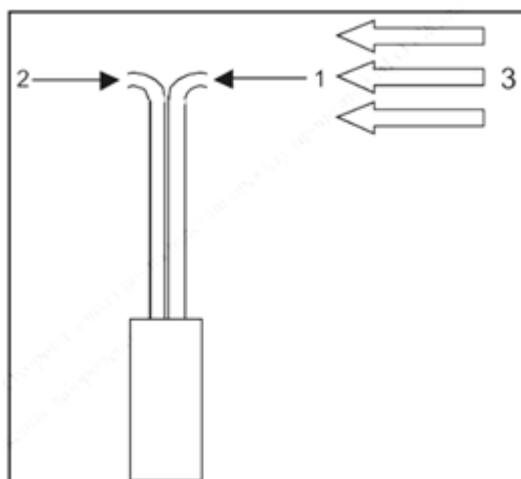
Рисунок 6.А.1 – Принцип визначення швидкості за перепадом тиску



Умовні позначки:

- | | | | |
|---|--|---|-----------------------|
| a | p_3 — статичний тиск | c | v — напрямок потоку |
| b | p_2 — загальний тиск
або тиск гальмування | | |

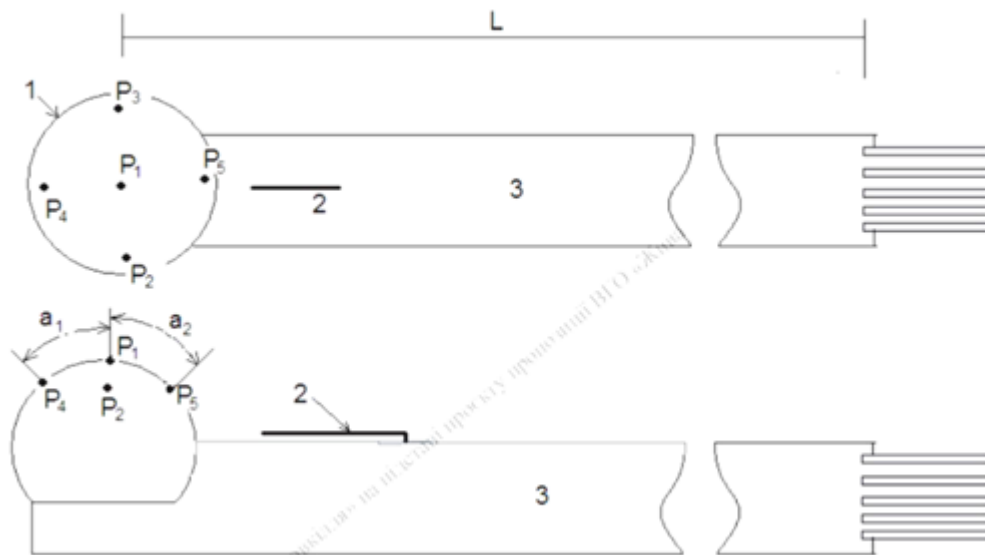
Рисунок 6.А.2 – Принципова схема трубки Піто L-типу



Умовні позначки:

- a p_3 — загальний тиск або тиск гальмування
- b p_2 — статичний тиск загальний тиск
- c v — напрямок потоку

Рисунок 6.А.3 – Принципова схема трубки Піто S-типу



Умовні позначки:

- 1 — сфера діаметром 38,1 мм (1,5 дюйма)
- 2 — термопара К-типу
- 3 — трубка діаметром 19,05 мм (0,75 дюйма)
- a_1 — сфера діаметром 38,1 мм (1,5 дюйма)
- a_2 — сфера діаметром 38,1 мм (1,5 дюйма)
- L_p — сфера діаметром 38,1 мм (1,5 дюйма)
- $P_1 \dots P_5$ — відведення (калібровані отвори), тиск у яких становить $p_1 \dots p_5$

Рисунок 6.А.4 – Трубка Піто 3D-типу (сферична)

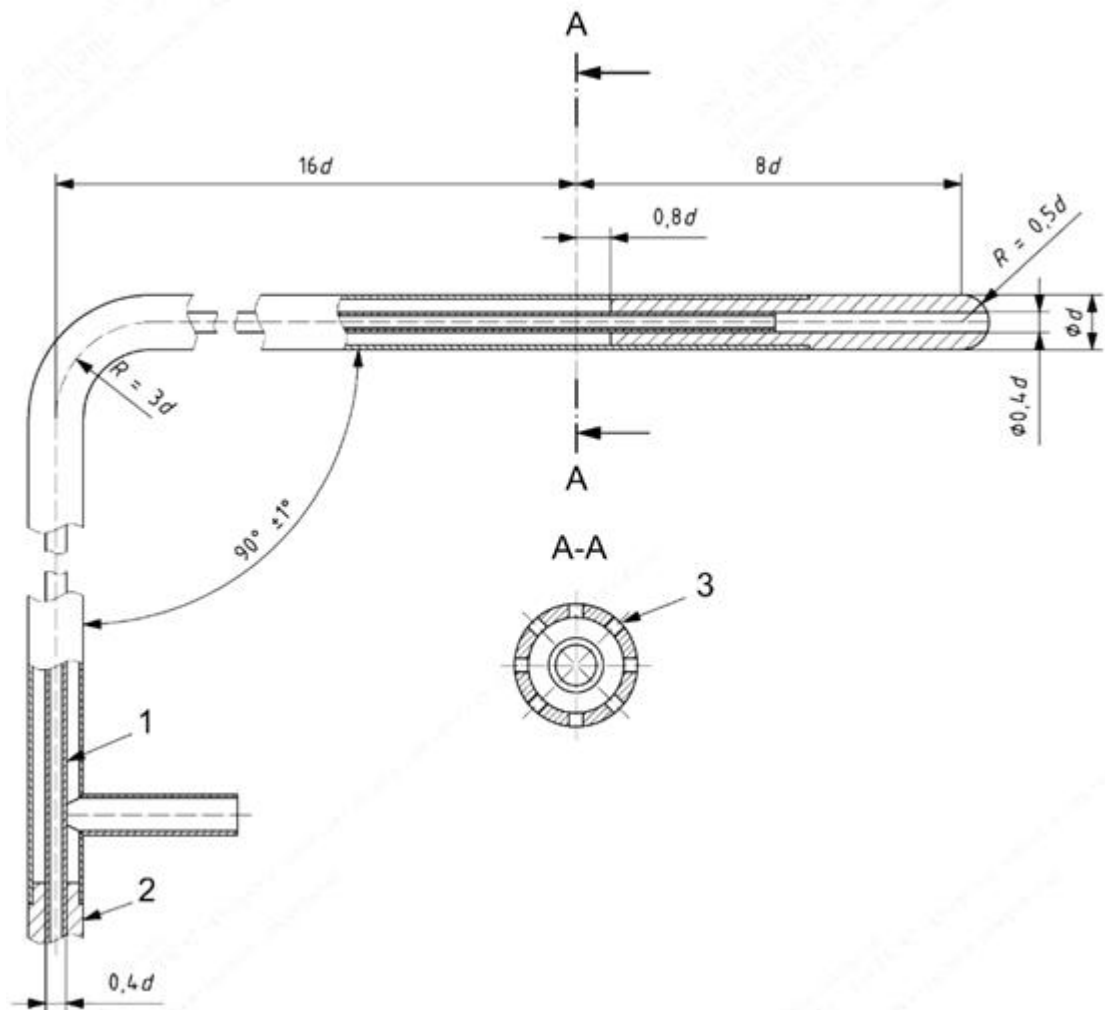
6.А.2.1.4 Трубка Піто 2D-типу

Зонд 2D-типу вимірює різницю між статичним та динамічним тиском і кутом ристання в повітроводі або димовій трубі. Крім того, ці вимірювання можна виконати за допомогою одного з зондів 3D-типу, описаних в 6.А.2.1.3, тільки в режимі визначення ристання. На підставі цих вимірювань і визначення густини димового газу обчислюють навколоосьову швидкість димового газу. Навколоосьова швидкість враховує компонент потоку, пов'язаний з ристанням, але не з кутом нахилу. Далі за середньою навколоосьовою швидкістю визначають середню об'ємну витрату газу в повітроводі або димовій трубі.

6.А.2.1.5 Приклади конструкцій трубок Піто

6.А.2.1.5.1 Трубка Піто АМСА-типу

Див. Рисунок 6.А.5.



Умовні позначки:

1 — внутрішній діаметр трубки

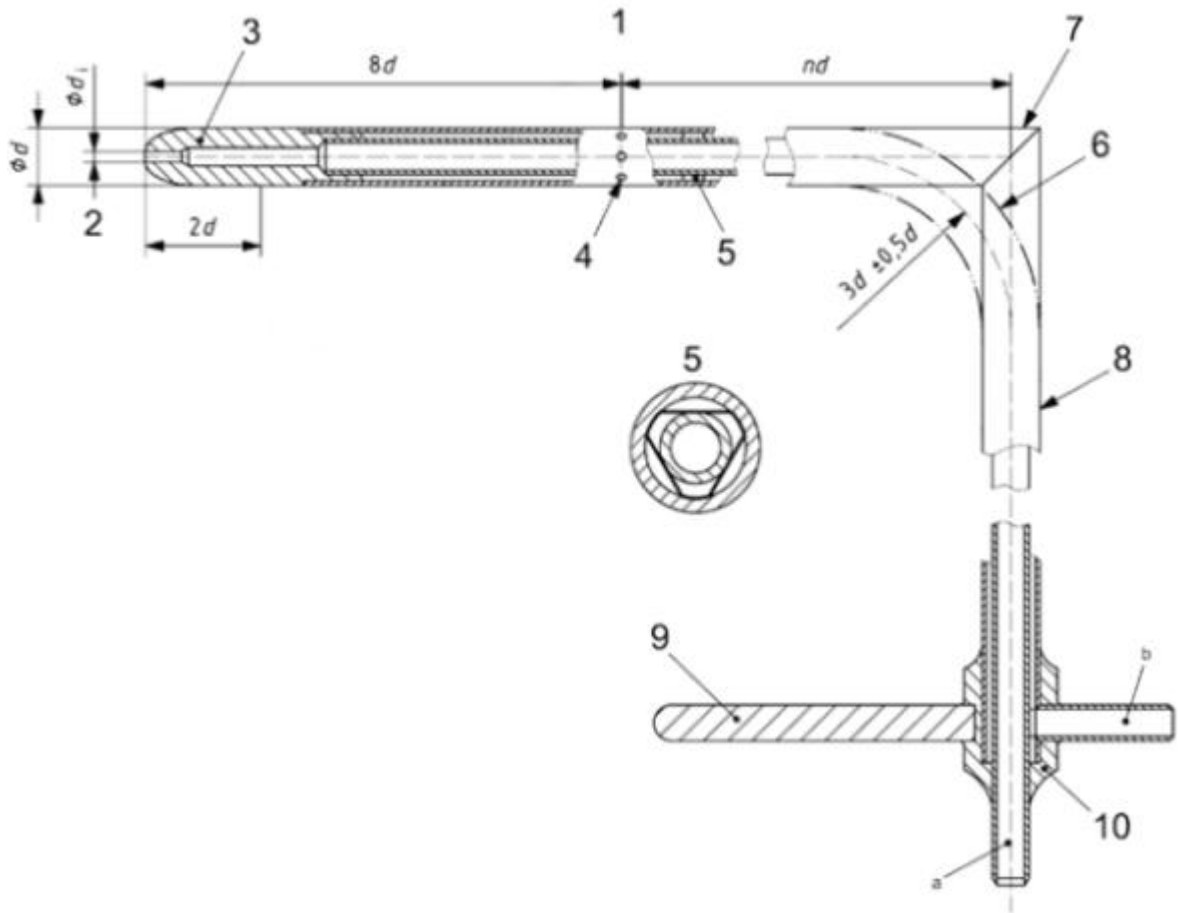
2 — зовнішній діаметр трубки

3 — вісім отворів діаметром $0,13d$, максимальний діаметр яких не повинен перевищувати 1 мм, отвори рівномірно розподілені, без задирок

Рисунок 6.А.5 – Трубка Піто АМСА-типу

6.A.2.1.5.2 Трубка Піто NPL-типу

Див. Рисунок 6.A.6.



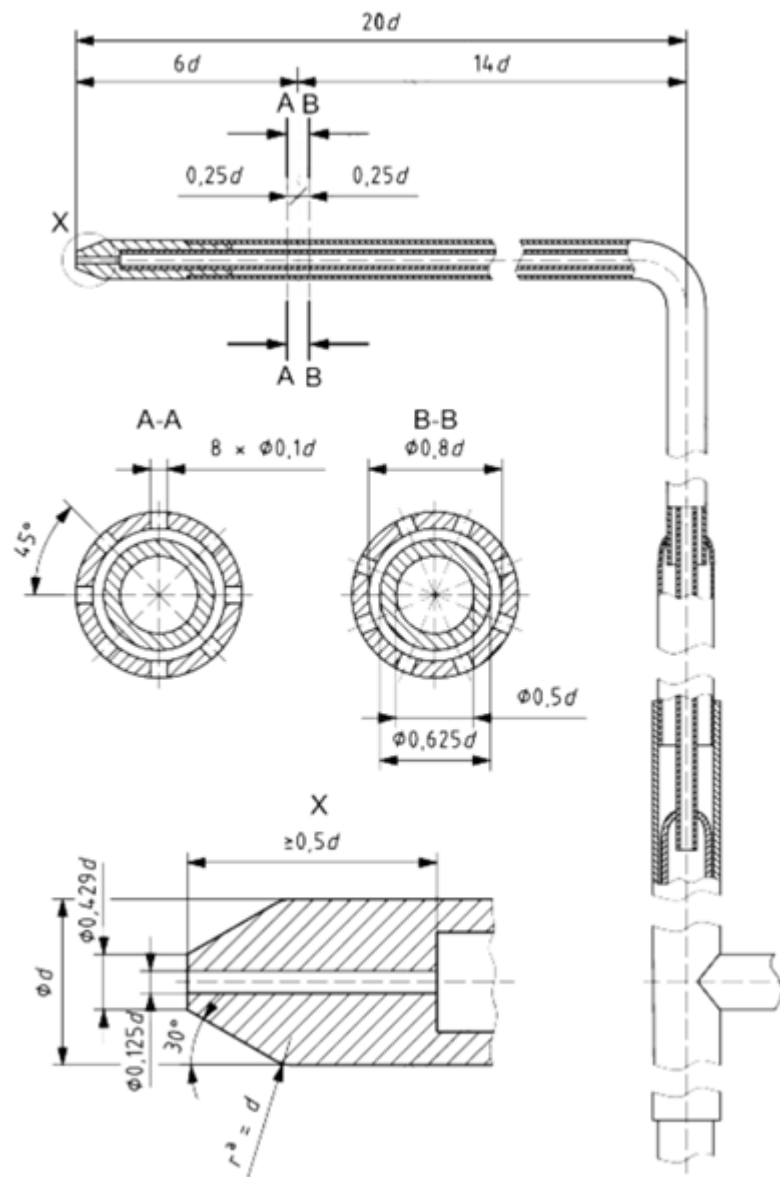
Умовні позначки:

- 1 — головка
- 2 — отвір загального тиску
- 3 — носик еліпсоїдальної форми
- 4 — отвори для вимірювання статичного тиску
- 5 — розпірна втулка
- 6 — альтернативний варіант: закруглене з'єднання
- 7 — кутове з'єднання
- 8 — хвостовик
- 9 — важіль вирівнювання
- 10 — гаряче врізання
- a — загальний тиск
- b — статичний тиск

Рисунок 6.A.6 – Трубка Піто NPL-типу

6.А.2.1.5.3 Трубка Піто СЕТІАТ-типу

Див. Рисунок 6.А.7.



Умовні позначки:

d — зовнішній діаметр

a — цей радіус використовують тільки тоді, коли трубку Піто використовують в рідинах, щоб уникнути кавітації

Примітка. Кількість відведень для вимірювання статичного тиску може бути обмежена тими, які вказані на перерізі А-А, в цьому випадку переріз А-А повинен бути розташований на відстані $6d$ від наконечника трубки.

Рисунок 6.А.7 – Трубка Піто СЕТІАТ-типу

6.A.2.2 Устаткування для вимірювання перепаду тиску

6.A.2.2.1 Загальні положення

Перепад тиску в характерних місцях по всій довжині димової труби вимірюють шляхом введення зонда з трубкою Піто на кінці в димову трубу. Датчик передає перепад тиску між відведеннями для вимірювання статичного тиску та тиску гальмування на пристрій для вимірювання перепаду тиску.

Таким чином, для вимірювання швидкості газу за перепадом тиску в певній точці димової труби необхідно:

- a) головку для вимірювання перепаду тиску – трубка Піто, як правило, S-типу (6.A.2.1.2), L-типу (6.A.2.1.1) або трубка Піто 3D-типу, наприклад, сферичної форми (6.A.2.1.3) або за Методом 2G EPA US [16];
- b) зонд – зазвичай є компонентом трубки Піто, але можна використовувати подовжувальні трубки за умови, що перед використанням вони будуть повністю перевірені на герметичність;
- c) пристрій для вимірювання перепаду тиску – похилий манометр або цифровий манометр, що відповідає вимогам таблиці 6.A.1;
- d) датчик температури димового газу;
- e) датчик атмосферного тиску.

Для одночасного вимірювання швидкості переміщення та швидкості фіксованої точки необхідними вважають пристрої a) – e). Якщо доступний лише один пристрій, наприклад, внаслідок обмежень доступу до порту або розмірів повітровою, то вимірювання у фіксованій точці необхідно проводити періодично під час вимірювань. Для отримання показань з фіксованої точки може бути використана АВС. Крім того, необхідно точно виміряти внутрішній діаметр і товщину стінок димової труби.

Примітка. За використання датчика Піто 3D-типу тиск на відведеннях для вимірювання тиску передається через декілька трубок на три пристрої для вимірювання перепаду тиску.

6.A.2.2.2 Трубка Піто

Трубка Піто повинна відповідати експлуатаційним вимогам, зазначеним в таблиці 6.A.1. Це може бути одна з конструкцій, описаних в цьому додатку, або

будь-яка інша конструкція, що відповідає експлуатаційним вимогам цього стандарту. Для багатьох застосувань можна використовувати трубку Піто 1D-типу [наприклад, S- або L-типу]. Там, де спостерігають значний неосьовий потік або завихрення, трубка Піто 3D-типу, наприклад сферична, може забезпечити менші значення невизначеності.

Зонди та головки трубок Піто повинні бути виготовлені з матеріалу, який не піддається механічному впливу температур всередині димової труби.

Елементи зонда трубки Піто, які залишають зовні димової труби, повинні бути обладнані механізмом для визначення орієнтації трубки в димовій трубі та методикою для позначення відстані, на яку зонд було введено в димову трубу. Завдяки цьому можливо правильно розташувати сенсорну головку в необхідних точках вимірювання всередині повітроводу.

Трубка Піто повинна бути відкалібрована за витратами, репрезентативними для умов потоку в трубці, а використовувані точки калібрування повинні відповідати діапазону її роботи (наприклад, подвійна максимальна витрата плюс фіксований відсоток від максимальної витрати).

Калібрування слід проводити в декількох точках, що охоплюють діапазон застосовуваних швидкостей. Калібрування має забезпечувати метрологічну простежуваність. Цього можна досягти, наприклад, за допомогою проточної установки, швидкість потоку якої можна простежити за допомогою лазерної доплерівської анемометрії.

Якщо трубку Піто (зазвичай S-типу) використовують в конфігурації з тісно пов'язаним з нею зондом для відбирання проб газу, то прилад повинен бути відкалібрований в цій конфігурації.

Використання стандартних коефіцієнтів калібрування Піто і характеристик, заснованих виключно на критеріях конструкції трубки Піто, не допускається в межах цього стандарту. Пристрої повинні бути відкалібровані та пройти відповідну оцінку ефективності.

Будь-які інші умови потоку, що впливають на перепад тиску (наприклад, турбулентність у випадку за використання трубок Піто S-типу), повинні бути належним чином враховані при калібруванні.

Примітка. Вимога щодо калібрування може бути виконана за наявності відповідного простежуваного сертифіката, підготовленого виробником згідно з цим стандартом. Якщо трубка не має механічних пошкоджень, повторне калібрування не потрібне.

6.A.2.2.3 Прилад для вимірювання перепаду тиску

Вимірювання перепаду тиску між відведеннями датчика трубки Піто здійснюють за допомогою диференційного манометра; це може бути як похилий манометр, так і електронний диференційний манометр.

Для похилого манометра потрібно врахувати поправку на температуру навколишнього середовища.

Манометр диференційного тиску повинен бути відкалібрований у діапазоні, що відповідає застосуванню. Калібрування повинно бути метрологічно простежуваним до системи SI.

Верхня межа діапазону калібрування приладу не має перевищувати трикратного значення максимального перепаду тиску, який вимірюватиме прилад.

Демпферний пристрій може знадобитися, якщо умови в димовій трубці спричиняють коливання в показаннях перепаду тиску, що робить неможливим досягнення необхідної невизначеності в показаннях тиску. Демпфірування потрібно, якщо величина коливань перепаду тиску (амплітуда) становить більше ніж 10 % від середнього значення в місці вимірювання. Демпферний пристрій може складатися з демпферного циліндра або капілярної трубки, які встановлені в рідинному манометрі, або іншій пристрої, передбаченому або рекомендованому виробником. Необхідно підтвердити, що демпферний пристрій не справляє систематичного впливу на показання перепаду тиску.

Примітка. В додатку D до стандарту ISO 3966:2008 [3] описана методика демпфірування системи рідинних манометрів з використанням капілярної трубки.

Частота калібрування диференційного манометра залежить від його призначення. Користувач може перевірити, що калібрування диференційного

манометра все ще дійсне шляхом періодичних перевірок диференційного манометра.

6.А.2.2.4 *Вимірювання параметрів димових газів*

Обчислення швидкості димових газів на основі вимірювання перепаду тиску за допомогою трубки Піто передбачає знання густини димових газів, яку визначають за температурою, статичним тиском і молярною масою газу.

Для приведення вимірюного потоку до стандартних умов (див. 6.6.6 посібника) необхідні наступні параметри димового газу:

- температура;
- водяна пара;
- за необхідності, вимірювання вмісту кисню або CO₂.

Ці дані можна отримати за допомогою відкаліброваних автоматизованих інструментів моніторингу, встановлених у димовій трубі.

Для вимірювання температури димових газів у місці розташування датчика Піто використовують температурний датчик. Цей датчик повинен бути відкалібрований і повинен відповідати експлуатаційним вимогам, наведеним в таблиці 6.А.1.

Вимірювання концентрації кисню в димовому газі проводять відповідно до стандарту EN 14789.

Вимірювання концентрації водяної пари в димовому газі проводять відповідно до стандарту EN 14789.

У разі сухого повітря (вологість менше ніж 1 %) молярну масу можна прийняти рівною 29 кг/кмоль.

Таблиця 6.А.1 – Експлуатаційні вимоги до вимірювання витрати на основі перепаду тиску

Параметр	Критерій	Метод визначення
Мінімальний перепад тиску	5 Па	Оцінювання ефективності пристрою для вимірювання перепаду тиску

Невизначеність калібрування засобу вимірювання температури, який складається з датчика температури та індикатора	$\leq 1\%$ від значення	Оцінювання ефективності датчика температури відповідно до стандартів для термопар
Невизначеність калібрування датчика перепаду тиску, що використовують для вимірювання динамічного та статичного тиску	$\leq 1\%$ від значення або ≤ 20 Па, залежно від того, яке з цих значень більше	Оцінювання ефективності пристрою для вимірювання перепаду тиску

6.A.3 Обчислення

6.A.3.1 Визначення швидкості за допомогою приладів перепаду тиску

Принцип визначення швидкості газу в будь-якій точці секції вимірювання за допомогою трубки Піто полягає у вимірюванні динамічного тиску в цій точці за допомогою трубки Піто, з'єднаної з манометром. Локальну швидкість в точці вимірювання i , v_i , м/с, далі обчислюють відповідно до формули (6.A.1):

$$v_i = K \sqrt{\frac{2\overline{\Delta p_i}}{\rho}}, \quad (6.A.1)$$

- де $\overline{\Delta p_i}$ – середній динамічний тиск, виміряний в точці i секції вимірювання, Па;
- K – коефіцієнт трубки Піто, який містить калібрувальний коефіцієнт Піто та постійні значення, що стосуються конструкції трубки Піто;
- ρ – густина викидів газу, в умовах температури та тиску вологого газу, кг/м³.

Середній динамічний тиск Δp_i дорівнює середньому арифметичному n вимірювань динамічного тиску, виконаних в кожній точці i :

$$\overline{\Delta p_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta p_i, \quad (6.A.2)$$

Пряме визначення $\overline{\Delta p_i}$ можна здійснювати за допомогою відповідного цифрового манометра, який видає середнє значення динамічного тиску за необхідний період усереднення.

Формули (6.A.3) – (6.A.10) використовують для обчислення швидкості, ризику, кута нахилу та об'ємної витрати газу за допомогою Методу 3D EPA US [15].

$$F_1(i) = \frac{(p_1 - p_2)_i}{(p_4 - p_5)_i}, \quad (6.A.3)$$

$$F_2(i) = C_p \sqrt{\frac{\Delta p_{std}}{(p_1 - p_2)_i}}, \quad (6.A.4)$$

$$M_s = M_d(1 - \varphi_{ws}) + 18\varphi_{ws}, \quad (6.A.5)$$

$$p_s = p_{atm} + \frac{p_g}{13,6}, \quad (6.A.6)$$

$$T_{s(i)}R = 460 + T_{s(i)}^{\circ}F, \quad (6.A.7)$$

$$v_{a(i)} = K_p F_2(i) \sqrt{\frac{(p_1 - p_2)_i T_{s(i)}}{p_s M_s}} [\cos\theta_{y(i)}][\cos\theta_{p(i)}], \quad (6.A.8)$$

$$q_{V,sw} = 360 v_{a(avg)} A_s \left[\frac{T_{std}}{T_{s(avg)}} \right] \left(\frac{p_s}{p_{std}} \right), \quad (6.A.9)$$

$$q_{V,sd} = q_{V,sw}(1 - \varphi_{ws}), \quad (6.A.10)$$

- де A_s – площа перерізу димової труби, кв. фут;
- φ_{ws} – об'ємна частка водяної пари;
- K_p – коефіцієнт перерахунку, $85,49 \text{ фут/с}[(\text{фунт/фунт-моль}) (\text{дюймів рт.ст.})/(R)/(\text{дюймів вод. ст.})]^{0,5}$;
- M_d – молярна маса газу, суха основа, фут-фут/моль;
- M_s – молярна маса газу, волога основа, фут-фут/моль;
- p_{atm} – атмосферний тиск, дюймів рт. ст.;
- p_g – статичний тиск, дюймів вод. ст.;
- p_s – абсолютний тиск у димовій трубі, дюймів рт. ст.;
- p_{std} – стандартний абсолютний тиск, 29,92 дюймів рт. ст.;
- $q_{V,sd}$ – середня об'ємна витрата димового газу (суха основа), скоригована до стандартних умов, сухих нормальних кубічних футів на годину (dscf/h);
- $q_{V,sw}$ – середня об'ємна витрата димового газу (волога основа), скоригована до стандартних умов, вологих нормальних кубічних футів на годину (wscf/h);
- $T_{s(avg)}$ – середня абсолютна температура димового газу в димовій трубі, R;
- $T_{s(i)}^{\circ}F$ – температура димового газу в точці перетину i , $^{\circ}F$;

- $T_{s(i)R}$ – абсолютна температура димового газу в точці перетину i , R;
- T_{std} – стандартна абсолютна температура, 528 R;
- $F_1(i)$ – співвідношення кутів нахилу в точці перетину i , безрозмірна величина;
- $F_2(i)$ – коефіцієнт калібрування швидкості 3D-зонда в точці перетину i , безрозмірна величина;
- $(p_1 - p_2)_i$ – перепад тиску залежно від швидкості в точці перетину i , дюймів вод. ст.;
- $(p_4 - p_5)_i$ – перепад тиску залежно від нахилу в точці перетину i , дюймів вод. ст.

6.A.3.2 Густина димового газу

Густину газу у викиді з повітроводу за температури та тиску навколишнього середовища, ρ , кг/м³, визначають за формулою (6.A.11):

$$\rho = \frac{M p_c}{R T_c}, \quad (6.A.11)$$

- де M – молярна маса вологого газу у викиді, кг/моль;
- p_c – абсолютний тиск в повітроводі секції вимірювання, Па;
- R – універсальна газова стала, 8,314 Дж/(К моль);
- T_c – температура газу в повітроводі, К.

6.A.3.3 Абсолютний тиск газу

Абсолютний тиск у повітроводі визначають шляхом вимірювання атмосферного тиску на місці та статичного тиску, виміряного в повітроводі. Статичний тиск вимірюють принаймні в одній точці кожної лінії вимірювання.

Для поліпшення якості вимірювання рекомендовано проводити кілька миттєвих вимірювань статичного тиску, щоб урахувати мінливість тиску і повторюваність вимірювань.

Статичний тиск, який використовують для обчислення абсолютного тиску, є середнім арифметичним значенням середніх статичних тисків, зафіксованих на кожній лінії вимірювання (двох діаметрів у випадку повітроводу з круглим

перерізом), тобто середнім арифметичним значенням усіх зафіксованих значень статичного тиску.

$$p_c = p_{atm} + \overline{p_{stat}}, \quad (6.A.12)$$

де p_c – абсолютний тиск в повітроводі секції вимірювання, Па;

p_{atm} – атмосферний тиск, Па;

$\overline{p_{stat}}$ – середній статичний тиск в секції вимірювання, Па.

Середній статичний тиск дорівнює середньому арифметичному значенню середніх статичних тисків, виміряних у кожній точці (принаймні по одному на лінію вимірювання), в Па

$$\overline{p_{stat}} = \frac{1}{n_1} \sum_{i_1=1}^{n_1} \overline{p_{stat,i_1}}, \quad (6.A.13)$$

де

$$\overline{p_{stat,i_1}} = \frac{1}{n_2} \sum_{i_2=1}^{n_2} p_{stat,i_1,i_2}, \quad (6.A.14)$$

де $p_{stat,i_1,i_2}, i_2 = 1 \dots n_2$ – i_2 -е вимірювання статичного тиску в точці i_1 , Па;

$\overline{p_{stat,i_1}}, i_1 = 1 \dots n_1$ – середній статичний тиск в точці i_1 , Па – n_1 дорівнює щонайменше кількості ліній вимірювання, досліджених в секції вимірювання.

6.A.3.4 Молярна маса газу

Молярну масу вологого газу у викиді в залежності від тиску та температури в повітроводі, M , кг/моль, визначають за формулою (6.A.15):

$$M = 10^{-3} \cdot \sum_{B=1}^q (M_B \varphi_B), \quad (6.A.15)$$

де M_B – молярна маса компонента В, кг/моль, для компонента з номером $B = 1 \dots q$;

φ_B – об'ємна частка компонента В, для компонента з номером $B = 1 \dots q$.

Молярну масу газу визначають, як правило, з хорошим наближенням, виходячи з вимірювань вмісту O_2 , CO_2 та водяної пари, за формулою (6.A.16).

Невизначеність, що виникає внаслідок такого наближення густини, є змінною і залежить від природи та концентрацій неврахованих компонентів.

$$M = 10^{-5} [32\varphi_{O_2,w} + 44\varphi_{CO_2,w} + 18\varphi_{H_2O} + 28 \cdot (100 - \varphi_{O_2,w} - \varphi_{CO_2,w} - \varphi_{H_2O})],$$

(6.A.16)

де M – молярна маса вологого газу в потоці, кг/моль;

$\varphi_{O_2,w}$ – концентрація O_2 в потоці газу у вологому газі, відсотки об'ємної частки;

$\varphi_{CO_2,w}$ – концентрація CO_2 в потоці газу у вологому газі, відсотки об'ємної частки;

φ_{H_2O} – концентрація водяної пари в потоці газу у вологому газі, відсотки об'ємної частки;

$100 - \varphi_{O_2,w} - \varphi_{CO_2,w} - \varphi_{H_2O}$ – відповідає вмісту азоту за умови, що інші компоненти, крім O_2 , CO_2 та водяної пари, у відсотках об'ємної частки, присутні у незначній кількості.

Це припущення справедливо для більшості джерел згорання.