

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

**ГРАДУЮВАННЯ ПРИЙМАЧІВ ПОВІТРЯНОГО  
ТИСКУ. ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ТА  
ВИТРАТИ ПОВІТРЯ**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ імені Ігоря Сікорського як  
навчальний посібник для студентів, які навчаються за спеціальністю 144  
"Теплоенергетика", освітньо-професійною програмою підготовки  
"Теплові електричні станції"*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2020

Градування приймачів повітряного тиску. Вимірювання швидкості та витрати повітря [Електронний ресурс]: навч. посіб. для лабор. робіт студ. спеціальності 144 «Теплоенергетика» /Укладачі: М.З. Абдулін, О.А. Сірий, Д.З. Пакош, О.О. Кобилянська; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,6 мБайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 65 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № 10 від 18.06.2020р.)  
за поданням Вченої ради Теплоенергетичного факультету  
(протокол № 10 від 25.05.2020 р.)*

Електронне мережеве навчальне видання

## **ГРАДУЮВАННЯ ПРИЙМАЧІВ ПОВІТРЯНОГО ТИСКУ. ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ТА ВИТРАТИ ПОВІТРЯ**

Укладачі: *Абдулін Михайло Загретдинович, доктор техн. наук, доцент;  
Сірий Олександр Анатолійович, канд. техн. наук, доцент  
Пакош Дмитро Зеновійович, аспірант;  
Кобилянська Ольга Олександрівна, магістрантка*

Рецензент: *Баранюк Олександр Володимирович, канд. техн. наук, доцент*

Відповідальний редактор: *Бутовський Леонід Сергійович, канд. техн. наук, доцент*

Посібник призначений для студентів, які навчаються за спеціальністю 144 «Теплоенергетика», освітньо-професійна програма «Теплові електричні станції» для виконання лабораторних робіт з дисципліни «Теплотехнічні вимірювання».

Вказівки містять перелік необхідних рекомендацій стосовно проведення повірочних та градувальних робіт пневмометричних пристроїв вимірювання швидкості потоку повітря. Подані методичні рекомендації стануть у нагоді при вимірюванні швидкостей і витрат газів, а методика побудови градувальних характеристик напоромірних датчиків та вторинних приладів знадобиться при проведенні теплотехнічного налагоджування вогнетехнічного обладнання промислових паливоспалювальних установок.

## ЗМІСТ

ЗМІСТ .....	3
Фізичні основи вимірювання швидкості за допомогою насадків повітряного тиску .....	5
1. Методика визначення швидкості потоку приймачем повітряного тиску .....	5
1.2. Визначення швидкості потоку методом перепаду тисків .....	10
Контрольні запитання .....	12
1.3 Опис лабораторної установки .....	12
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 .....	15
Тарування рідинних мікроманометрів .....	15
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 .....	26
Повірка електронного дифманометру .....	26
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 .....	30
Визначення коефіцієнта поля швидкісних напорів в робочій частині аеродинамічної труби .....	30
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4 .....	36
Тарування насадку приймача повітряного тиску .....	36
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 .....	42
Визначення швидкості і витрати технологічних газів у газоходах .....	42
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6 .....	49
Визначення швидкості і витрати технологічних газів у газоходах .....	49
Перелік посилань .....	56
Додаток А .....	57
Розрахунок датчиків повного напору (інтегруючих трубок) .....	57
Додаток Б .....	60
Тиск та густина насиченої пари .....	60
Додаток В .....	61
Номограма розрахунку відносної вологості повітря .....	61
Додаток Г .....	62
Оцінка похибки вимірювання витрати комплектом ППТ та чашкового дифманометру з похилою мірною трубкою .....	62
Додаток Г .....	65
Термоанемометр Tenmars TM-4001 .....	65

## **Мета проведення лабораторних робіт**

Одним з головних параметрів руху рідини або газу є його швидкість. Вона може визначатись декількома методами: за швидкістю переміщення зважених у потоці часток (кінематичний метод), за швидкістю обертання встановленої у потоці крильчатки (анемометричний метод), за різницею повного і статичного тисків у точці потоку (пневмометричний метод), за інтенсивністю тепловіддачі розміщеного у потоці елемента, що нагрівається (термометричний метод).

Всі зазначені методи мають свої переваги і недоліки, а їх вибір пов'язано зі специфікою вимірюваного потоку та умов проведення дослідів. У практиці газодинамічного експерименту найбільше розповсюдження отримав пневмометричний метод вимірювання швидкості потоку. Приведені рекомендації містять докладні методики проведення повірки та тарування пневмометричних датчиків повітряного тиску та манометрів з похилою мірною трубкою, наведено методичні рекомендації щодо розрахунку датчиків у відповідності до умов мірної ділянки повітропроводу, представлено сучасні засоби вимірювання витрати та швидкості, а також надано рекомендації щодо оцінки точності виконання замірів.

# ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ЗА ДОПОМОГО НАСАДКІВ ПОВІТРЯНОГО ТИСКУ

## 1. Методика визначення швидкості потоку приймачем повітряного тиску

Найбільш поширеним в даний час методом визначення швидкості потоку в аеродинамічних трубах є спосіб, пов'язаний із застосуванням насадка, так званого приймача повітряного тиску ППТ.

Приймач тиску (насадок) представляє собою поєднання трубки повного напору та приймача статичного тиску (рис. 1.1). Цей прилад фіксує різницю між повним напором, який сприймається фронтовим отвором трубки насадка, і статичним, який у свою чергу, сприймається статичними отворами на боковій поверхні трубки [1].

Величина статичного тиску потоку  $p_{ст}$  пов'язана з величиною швидкісного напору  $q = \frac{\rho V^2}{2}$  для середовища, що не стискається наступною залежністю рівняння Бернуллі:

$$p_{повн} = \frac{\rho V_1^2}{2} + p_{ст1} = \frac{\rho V_2^2}{2} + p_{ст2} = const \quad (1.1)$$

і, як видно, змінюється зі зміною швидкості  $V$ .

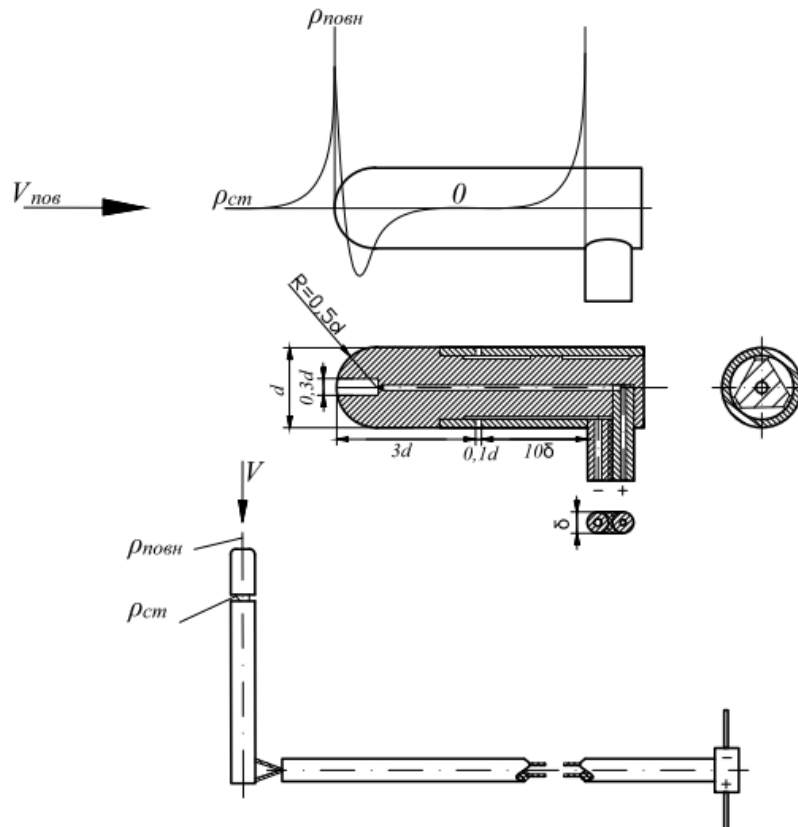


Рис. 1.1 Схема приймача повітряного тиску ППТ

Картину обтікання насадка можна схематично уявити собі таким чином. Струмені потоку поблизу насадка викривляються, і сам потік розгалужується. В місці розгалуження потоку швидкість сильно зменшується і перед насадком утворюється як би застійна область з вкрай повільною течією. Якщо розглянути досить тонкий, в порівнянні з розмірами головки насадка, струмінь, який підходить через вісь насадка до місця розгалуження потоку, то можна наближено прийняти, що він в застійній області майже не рухається, тобто  $V = 0$ , а тиск швидко зростає і в критичній точці доходить до значення величини повного тиску  $p_{повн}$ .

У точках, що знаходяться недалеко від критичної, тиск різко падає від величини  $p_{повн}$  до  $p_{ст}$  і далі у напрямку потоку теж спостерігається зниження тиску, а потім по мірі подальшого віддалення від передньої кромки насадка знову підвищується, асимптотично наближаючись до статичного. Присутність державки у приймача тиску викликає гальмування потоку (підпір) і таким чином підвищує тиск. Неважко знайти на поверхні трубки місце, в якому тиск дорівнюватиме статичному. Отвори для прийому статичного тиску на бічній поверхні зручно зробити саме в цьому місці трубки.

Показаний на рис. 1.1 прилад є не єдиним типом приймача тиску. У деяких трубках, що виготовлені за такою ж схемою намагаються усунути вплив державки розміщенням отворів на більшій відстані від неї. У окремих випадках виготовляють приймачі статичного тиску у вигляді кільцевої щілини або розміщують ряд маленьких отворів на одній прямій, з іншого боку від площини розміщення державки, щоб мінімізувати вплив підпору. Слід зазначити, що авіаційні насадки часто взагалі не мають державки.

Якщо отвір повного напору насадка з'єднати з одним коліном мікроманометра, а отвір статичного тиску - з іншим, то мікроманометр покаже безпосередньо різницю тисків:

$$p_{повн} - p_{ст} = \frac{\rho V^2}{2} = q, \quad (1.2)$$

яка вважається динамічним тиском або швидкісним напором, що може вимірюватися системою безпосередньо насадка з мікроманометром.

Швидкість потоку обчислюється за формулою (без урахування впливу стисливості повітря), м/сек:

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho} q}, \quad (1.3)$$

або для умов середовища, що стискається, м/сек:

$$V = \sqrt{\frac{2(p_{повн} - p_{ст})}{\rho(1 + \epsilon_p)}}, \quad (1.4)$$

де  $\rho$  – щільність повітря на робочій частині аеродинамічної труби;

$\varepsilon_p$  – коефіцієнт, що враховує вплив стисливості повітря, визначається за графіком (рис. 1.2) в залежності від числа М; для середовища, що не стискається  $\varepsilon_p=0$ ;

$$q = \frac{\rho V^2}{2} \text{ – швидкісний тиск або динамічний тиск;}$$

$p_{повн} - p_{ст}$  – різниця між повним і статичним тиском потоку.

При вимірюванні швидкості потоку слід вести ретельний облік температури і тиску повітря. Атмосферний тиск вимірюється барометром у мм рт. ст. ( $p_a$  мм рт. ст.), температура - у °С.

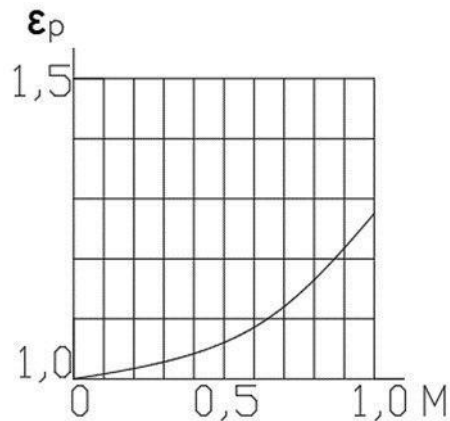


Рис. 1.2. Графік залежності  $\varepsilon_p = f(M)$ , [2]

Щільність повітря обчислюється за формулою:

$$\rho = 0,04737 \frac{p_a}{T}. \quad (1.5)$$

Підставивши значення у формулу для швидкості (нехтуючи впливом стисливості), отримаємо:

$$V = \sqrt{42,2 \frac{(273+t)}{p_a} q}. \quad (1.6)$$

Визначивши величини швидкісного напору  $q$ , атмосферного тиску  $p_a$  і температури  $t$ , можна обчислити значення швидкості у м/сек.

Якщо у формулу, для визначення швидкості  $V$ , підставити замість швидкісного напору  $q$  різницю повного і статичного тисків  $p_{повн} - p_{ст}$ , то можна отримати наближену розрахункову формулу:

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_{повн} - p_{ст})} \quad (1.7)$$

Насправді ми передаємо в широке коліно мікроманометра не повний тиск  $p_{повн}$ , який є тільки у критичній точці, а деякий середній тиск потоку, що має місце на поверхні

фронтного отвору насадка. Слід зазначити, що цей отвір, яким би малим він не був, практично займає завжди деяку кінцеву площу і не є точкою.

Крім того, статичний тиск вимірюється за допомогою насадка неточно і, не у тій самій точці, де вимірюється повний тиск. Може виявитися, що навіть у вільному потоці статичний тиск у двох точках, відстань між якими дорівнює відстані між отворами насадка, неоднаковий.

Отже, різниця тисків  $p_{повн} - p_{ст}$ , яка фактично передається на мікроманометр, залежить від форми і розмірів насадка і не дорівнює різниці між повним і статичним тиском потоку в одній і тій самій точці<sup>1</sup>.

Щоб врахувати поправку, у формулу (1.7) вводиться коефіцієнт  $\xi$ , що називається коефіцієнтом насадка, після чого формула набуде вигляду:

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_{повн} - p_{ст})\xi} \quad (1.8)$$

За експериментальними даними  $\xi$  коливається в межах від 1,01 до 1,04.

Виразивши різницю тисків  $p_{полн} - p_{ст}$  через висоту вертикального стовпа мікроманометра, матимемо:

$$p_{полн} - p_{ст} = (h - h_0)\gamma_{ж} = \frac{\rho V^2}{2} \frac{\gamma_B V^2}{2g} \quad (1.9)$$

де  $\gamma_{II}$  – вага одиниці об'єму повітря при  $p_0=760$  мм рт. ст. та  $t=15$  °С;

$\gamma_p$  – вага одиниці об'єму повітря за нормальних умов.

Скориставшись залежністю між  $p_{повн} - p_{ст}$  та  $(h - h_0)$  і прийнявши  $\gamma_p = \gamma_{II}$ , отримаємо новий вираз для швидкості потоку, м/сек:

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho}(h - h_0)\gamma\xi}. \quad (1.10)$$

Слід зазначити, що цей вираз не враховує індивідуальних особливостей потоку в аеродинамічній трубці і мікроманометрі; крім того, він придатний для застосування тільки для мікроманометрів з вертикальною трубкою.

Для підрахунку швидкості незбуреного потоку у перерізі труби, де буде знаходитися досліджувана модель (рис. 1.3) за умови, коли трубка мікроманометра нахилена під кутом  $\varphi$

---

<sup>1</sup> Це значення прийнято лише для зручності розрахунку і зустрічається дуже рідко. При обчисленні швидкості за показаннями мікроманометра дуже важливо знати дійсне значення  $\gamma$  [2].

тобто  $h_n = (h - h_0) = (a - a_0) \sin \phi$ . Тоді у формулі (1.10) з'являться додаткові величини: коефіцієнт манометра  $K$  і коефіцієнт поля гідравлічної труби  $\mu$ , а формула (1.10) набуде вигляду, м/сек:

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho} (a - a_0) \sin \phi \gamma K \xi \mu} \quad (1.11)$$

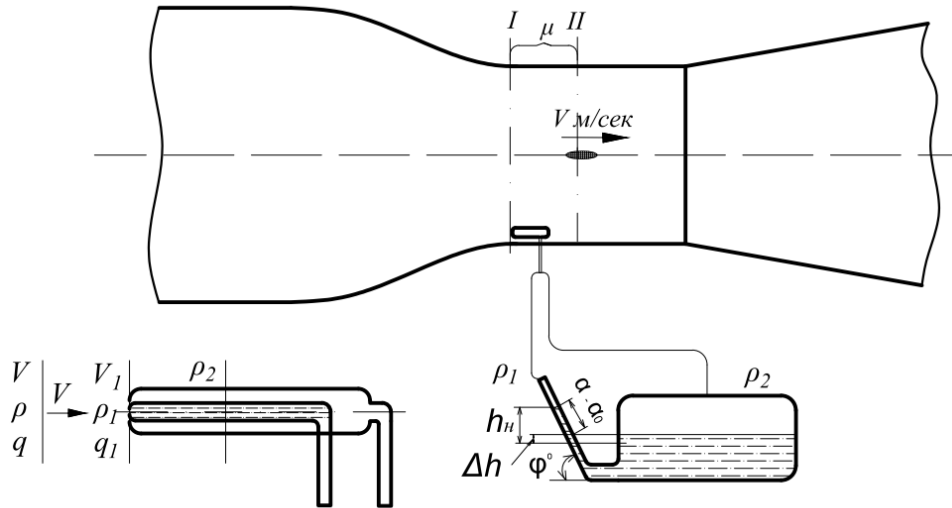


Рис. 1.3 Схема визначення швидкості повітряного потоку в аеродинамічній трубі ППТ:

$$h_1 - h_2 = h_n \gamma_p, \quad h_n = (a - a_0) \sin \phi + Dh; \quad Dh = \frac{(a - a_0) f}{F},$$

де  $f$  – площа отвору скляної трубки;

$F$  – площа поверхні рідини, що знаходиться в бачку.

Для того, щоб визначити необхідну і можливу точність відліків за мікроманометром, залежність (1.9) набуде вигляду:

$$V = \sqrt{2g \frac{\gamma_{жс}}{\gamma_B} (h - h_0)} \quad (1.12)$$

Якщо мікроманометр наповнений спиртом, то вага одиниці об'єму повітря при  $t_0 = 15^\circ\text{C}$  дорівнює  $\gamma_p = \gamma \approx 0,8$  кГ/дм<sup>3</sup>, вага одиниці об'єму повітря за нормальних умов  $\gamma_{II} = 0,001225$

кГ/дм<sup>3</sup>, їх співвідношення  $\frac{\gamma_p}{\gamma_{II}} = 653$ . Виражаючи  $(h - h_0)$  у мм, тобто в одиницях, в яких цю

величину відраховують, отримаємо швидкість  $V$  у м/сек:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 653}{1000}} \cdot \sqrt{(h - h_0)} = 3,57 \cdot \sqrt{(h - h_0)}$$

Таким чином, різниця висот в 1 мм спиртового стовпа відповідає швидкості повітря 3,57 м/сек.

Якщо взяти до уваги, що насадки досить надійно сприймають тиск при  $Re = \frac{Vd_{нас}}{\nu} \geq 700$ , тоді нижню межу швидкості потоку, при якій можна проводити вимірювання насадком, слід визначати за виразом:

$$V \geq \frac{700\nu}{d_{нас}}. \quad (1.13)$$

## 1.2. Визначення швидкості потоку методом перепаду тисків

В аеродинамічних трубах, особливо у трубах замкнутого типу з відкритою робочою частиною, швидкість повітряного потоку часто визначається за перепадом тисків. Для цього обирають дві контрольні площини; зазвичай перша контрольна площа збігається з вхідним перерізом сопла, друга – з обраним перерізом у робочій частині труби.

В обраних перетинах I і II (рис. 1.4) у стінках труби роблять 6-10 отворів, які з метою уникнення випадкових помилок при вимірюванні тиску, об'єднують у самостійні колектори (для кожного перетину свій колектор).

Резервуар мікроманометра гумовим шлангом з'єднується з отворами в стінці аеродинамічної труби, зробленими у якомусь перетині її форкамери (перетин I), а вимірювальна трубка мікроманометра з'єднується з іншими отворами в стінці, які зроблені в досліджуваному перерізі робочої частини (перетин II).

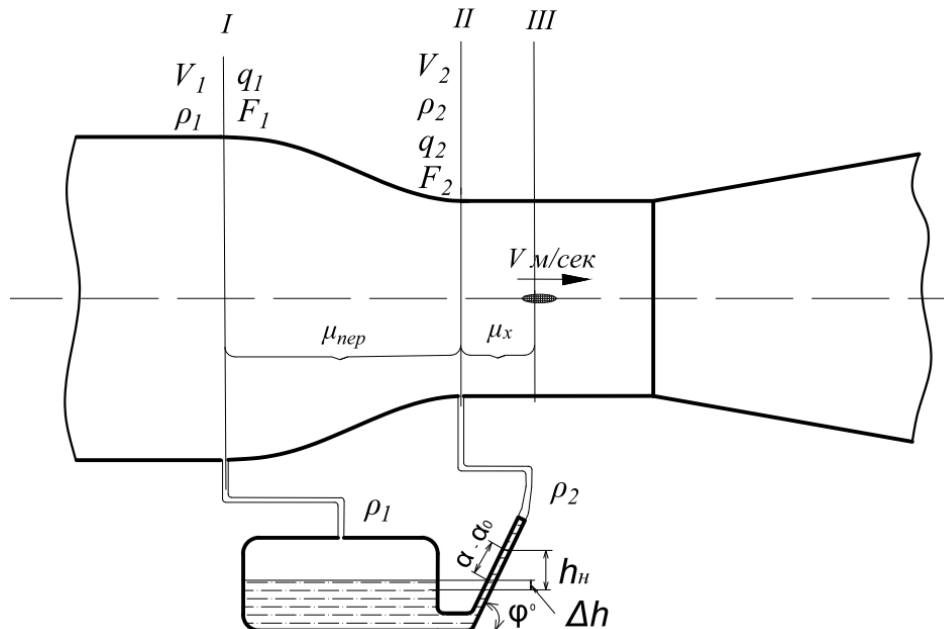


Рис. 1.4. Схема визначення швидкості повітряного потоку в аеродинамічній трубі за перепадом тиску:

$$p_1 - p_2 = h_n \gamma_{жс}; \quad h_n = (a - a_0) \sin \phi + \Delta h, \quad \Delta h = \frac{(a - a_0) f}{F}, \text{ де}$$

$f$  – площа отвору скляної трубочки;

$F$  – площа поверхні рідини, що знаходиться в бачку.

Якщо труба відкритого типу, то вимірювальну трубку мікроманометра потрібно відкрити прямо в атмосферу. Для двох цих перетинів рівняння Бернуллі запишеться:

$$p_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} + \zeta \frac{\rho V_2^2}{2}, \quad (1.14)$$

і рівняння нерозривності:

$$\rho F_1 V_1 = \rho F_2 V_2, \quad (1.15)$$

де  $\zeta$  – коефіцієнт гідравлічних втрат між перерізами, що розглядаються;

$F_1$  – площа першого перерізу;

$F_2$  – площа другого перерізу.

З рівнянь (1.14) і (1.15) отримуємо величину перепаду тисків:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{\rho V_2^2}{2} \left[ 1 + \zeta - \left( \frac{F_2}{F_1} \right)^2 \right].$$

З цього рівняння швидкість  $V_2$  визначиться в наступному вигляді:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2) \frac{1}{\left[ 1 + \zeta - \left( \frac{F_2}{F_1} \right)^2 \right]}} = \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2) \mu_{nep}},$$

$\mu_{nep}$  – коефіцієнт перепаду, що характеризує дану аеродинамічну трубу і дорівнює

$$\mu_{nep} = \left[ 1 + \zeta - \left( \frac{F_2}{F_1} \right)^2 \right].$$

Цей коефіцієнт визначається таруванням для даних конкретних умов і розташуванням отворів, що вимірюють перепад тисків.

Враховуючи кут нахилу трубки мікроманометра, питому вагу рідини і коефіцієнт поля труби  $\mu$ , що включає в себе коефіцієнт перепаду  $\mu_{nep}$  і коефіцієнт втрат по довжині  $\mu_x$ , від перетину II до перетину III (див. рис. 1.4), отримаємо формулу швидкості незбуреного потоку в перерізі, де буде знаходитися модель, м/сек:

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho} (a - a_0) \sin \phi \gamma K \mu}, \quad (1.16)$$

Оскільки наведені методи визначення швидкості потоку дають тотожні результати, застосування одного або іншого методу обумовлюється виключно конструкцією труби. Так, наприклад, при закритій робочій частині частіше використовується насадок, а при відкритій – метод перепаду тисків. Добуток коефіцієнтів  $\xi \mu$  у формулі (1.11) чисельно дорівнює коефіцієнту поля труби  $\mu$  у формулі (1.16) [2].

## Контрольні запитання

1. Яке призначення мають окремі частини аеродинамічної труби: сопло, дифузор, форкамера, робоча частина та інші?
2. Яка фізична сутність коефіцієнта поля труби  $\mu$ , коефіцієнта манометра  $K$  і коефіцієнта насадка  $\xi$ ?
3. Що таке повний тиск, статичний тиск і швидкісний напір повітряного потоку?
4. Як змінюються швидкість і тиск по довжині сопла і дифузора?
5. Що таке коефіцієнт гідравлічних втрат  $\zeta$ ?
6. Як впливає стисливість повітря на величину її швидкості?

### 1.3 Опис лабораторної установки.

Аеродинамічна ділянка із необхідним обладнанням для проведення вимірювань швидкості потоку приведена на рис. 1.5. Позначення на рисунку: 1 – аеродинамічна труба з відцентровим вентилятором обладнаним частотним регулятором обертів робочого колеса; 2 – рухоме кріплення ППТ, який тарується, з можливістю зміни його кута атаки та вертикально-просторового розміщення у потоці повітря, що набігає; 3 – зразкова трубка Піто; 4 – ППТ у вигляді інтегруючої трубки повного напору; 5 – приймач статичного тиску на стінці вимірювальної ділянки; 6 – барометр; 7 – гігрометр психрометричний; 8 – клапан багатоходовий; 9 – мікроманометр з похилою трубкою типу ММН – 1; 10 – мікроманометр з похилою трубкою модифікований; 11 – дифманометр портативний електронний ІЗ RS232; 12 – датчик температури і вологості





Рис. 1.6 Фото лабораторної установки

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

### Тарування рідинних мікроманометрів

Мета роботи – придбання навичок у роботі з рідинними мікроманометрами зі змінним нахилом вимірювальної трубки і ознайомлення з конструкцією; оцінка помилок вимірювань, а також вивчення способів обробки експериментального матеріалу (правильної і раціональної організації обчислень і методів побудови діаграм). Результат роботи наводиться у вигляді діаграми, яка визначає коефіцієнт мікроманометра, що тарується.

#### Загальні відомості та характеристика вимірювального обладнання

Одним з основних вимірів в експериментальній аеродинаміці є вимір надлишкового тиску в потоці повітря, тобто різниці між статичним тиском в потоці і атмосферним тиском. Найважливішим виміром є різниця між повним напором і статичним тиском потоку. Крім цих вимірювань на практиці доводиться постійно проводити визначення й інших різниць тисків. Всі ці вимірювання проводяться за допомогою мікроманометрів або манометрів (рис. 2.1).

Основними типами манометрів є рідинні, пружинні (пластинчасті та трубчасті), датчики тиску, що перетворюють тиск в електричний сигнал (індукційні, ємнісні, тензометричні). З усіма різновидами приладів має справу сучасна аеродинаміка. «Класичним» найбільш поширеним приладом є рідинний манометр або мікроманометр. Рідина, що використовується в манометрі, повинна мати малу в'язкість і малу величину капілярної постійної, малу випаровуваність і малу схильність до забруднення, бути хімічно стійкою і не поглинати вологу з навколишнього середовища. Питома вага рідин, що застосовуються у манометрах, коливається від 0,7 до 4,0 г/см<sup>3</sup>, винятком є ртуть з питомою вагою 13,6 г/см<sup>3</sup>. Конструктивне оформлення мікроманометрів і манометрів рідинного типу досить різноманітне; ця різноманітність викликана необхідністю підвищення точності вимірювань.

Необхідність більшої швидкодії призвела до використання пружинних манометрів і різного типу датчиків тиску. Сьогодні широко застосовуються електронні манометри, хоча вони мають меншу точність проте завдяки зручності, набули значного поширення. Також для технічних вимірювань застосовуються мембранні і сільфонні прилади.

У процесі проходження лабораторних занять для створення більш чіткого уявлення щодо принципів і точності вимірювань тиску мікроманометром найбільш корисною стає робота з проведенням тарування мікроманометра.

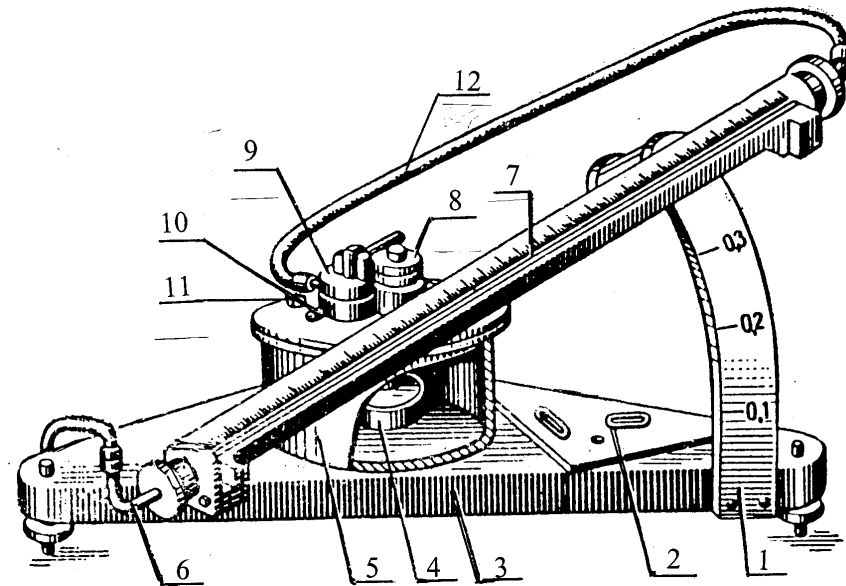


Рис. 2.1. Мікроманометр ММН з нерухогим резервуаром і змінним нахилом трубки:  
 1 – скоба; 2 – рівні; 3 – станина; 4 – диск; 5 – циліндрична посудина; 6 – трубка; 7 – трубка скляна; 8 – гвинт; 9 – кран перемикання; 10,11 – ніпелі для підключення напоромірних датчиків; 12 – гумова трубка.

Мікроманометр складається з металевому корпусу 3, циліндричної нерухокої металевої чашки 5 з вертикальною віссю, поворотної скляної трубки 7 зі шкалою, яка закріплена на рамці і може повертатися щодо осі корпусу на кут від 10 до 90°. Геометрична вісь обертання трубки збігається з нульовим діленням шкали. Положення рамки з трубкою 7 фіксується на скобі 1 фіксатором. Корпус мікроманометра встановлюється на трьох опорах, з яких права опора є нерухоною, а ліві опори - гвинти - дозволяють встановити прилад в горизонтальному положенні по рівням 2, вмонтованим в плиту корпусу. Нижній кінець вимірювальної трубки 7 з'єднаний з чашкою гумовою трубкою 6. Спирт заливають в чашку 5 через спеціальний отвір, закритий пробкою 8. Для установки меніска спирту в трубці на нуль шкали є регулятор рівня. При обертанні гвинта регулятора за годинниковою стрілкою відбувається витіснення спирту з чашки в трубку і збільшення його рівня в чашці і трубці. В кришку чашки вмонтований триходовий кран 9, в корпусі крана є три штуцера (рис. 2.2).

Штуцер 10 («плюс») служить для підведення тиску до чашки, штуцер 11 («мінус») призначений для прийому тиску і передачі його на спирт в трубці, за допомогою третього штуцера, з'єданого гумовою трубкою 12 з верхнім кінцем вимірювальної скляної трубки 7. У корпусі крана є отвір «нуль», через який атмосферний тиск передається в чашку і трубку, коли ручка крана 9 повернута проти годинникової стрілки до упору. Це положення крана застосовується при установці меніска спирту в трубці проти нульового розподілу шкали. При цьому вимірювальні штуцери чашки («плюс») і трубки («мінус») відключаються.

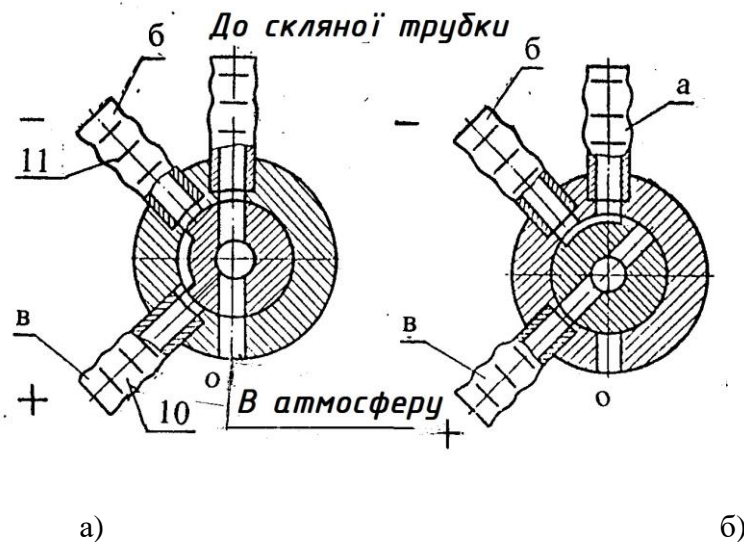


Рис. 2.2. Схема включення триходового крана: зліва - при контролі нуля; праворуч - при вимірі тиску.

Схема включення триходового крана при налаштуванні нуля показана на рис. 2.2, а. Після установки меніска на нуль шкали за допомогою регулятора рівня ручку крана 9 повертають за годинниковою стрілкою до упору для вимірювання тиску. Триходовий кран займає положення, показане на рис. 2.2,б. При цьому отвір «нуль» в корпусі крана перекривається і відключає прилад від атмосфери, поєднуючи верхній кінець вимірювальної трубки 7 з «мінусом» штуцера. Штуцер 10 («плюс») з'єднується з чашкою, штуцер 11 («мінус») з'єднується за допомогою кільцевої виточки в пробці крана зі штуцером скляної трубки. Коефіцієнт приладу при вимірюванні тисків вказано на скобі близько фіксатора 1 - к.

Мікроманометр типу ММН має таку технічну характеристику:

1. Довжина шкали 300 мм.
2. Межі вимірювання: максимальна - до 240 мм вод. ст. (Перша мінімальна межа при коефіцієнті приладу  $k=0,2$  - до 60 мм вод. ст., друга межа при  $k=0,3$  - до 90 мм вод. ст., третя межа при  $k=0,4$  - до 120 мм вод. ст., четверта межа при  $k=0,6$  - до 180 мм вод. ст., п'ята межа при  $k=0,8$  - до 240 мм вод. ст. При цих межах ціна 1 мм шкали відповідає тиску в 0,2; 0,3; 0,4; 0,6 і 0,8 мм вод. ст).
3. Заповнювач – етиловий спирт з питомою вагою  $0,8095 \text{ г/см}^3$ .
4. Похибка вимірювання не перевищує 0,5-1,0% від верхньої межі вимірювання.
5. Допустимий тиск під час перевірки герметичності чашки і трубки приладу – до 2000 мм вод. ст.

Існує велика кількість різновидів цих приладів, що пояснюється відмінністю досліджень: вимір великих і малих перепадів тиску, малих тисків (вакууметрія), змінних тисків з дуже високими частотами коливань та інше [3].

**Порядок виконання роботи з мікроманометром типу ММН**

1. Встановити прилад на стійкому столі.
2. Відрегулювати горизонтальне положення корпусу приладу гвинтами за рівнями 2 (рис. 2.1). Спочатку рекомендується обертати гвинт для встановлення першого рівня 2, а потім обертати другий гвинт і встановлювати другий рівень, розташований перпендикулярно першому.
3. Встановити рамку з вимірювальної трубкою на максимальну межу вимірювання  $k=0,8$ , щоб при вимірах невідомого тиску не відбулося переливання спирту через верхній кінець вимірювальної трубки.
4. Повернути ручку триходового крана проти годинникової стрілки на «нуль».
5. Перевірити наявність спирту в чашці по меніску в трубці близько нульового розподілу. Якщо спирт не залитий або не наближається до нульової поділки шкали, відвернути пробку, залити або долити спирт в такій кількості, щоб рівень спирту в трубці був близький нуля. Закрити пробку до упору.
6. Обертанням гвинта регулятора рівня встановити меніск спирту в трубці на нуль шкали.
7. Повернути ручку триходового крана за годинниковою стрілкою до упору.
8. До «плюса» штуцера триходового крана мікроманометра підключений гумовий шланг з ППТ для вимірювання повного тиску. Ці датчики призначені для вимірювання повного тиску потоку, що набігає
9. Кінець приймача статичного тиску, закріплено всередині повітряного каналу урівень з його стінкою, щоб усунути завихрення повітряного потоку при обтіканні і підвищити точність вимірювань. Ця трубка за допомогою гумового шланга сполучена з «мінусом» триходового крана.
10. Перед початком вимірів перевірити герметичність з'єднань: обережно вдихаючи повітря в отвір знімного ППТ, підняти спиртової стовпчик в мікроманометрі на 70-100 мм, а потім щільно затиснути отвір трубки. Якщо при цьому рівень спирту опускається, значить, в системі є нещільності. Необхідно ущільнити місця з'єднань трубок ПВХ зі штуцерами мікроманометра і ППТ і домогтися, щоб стовпчик спирту залишався нерухомим при перевірці на герметичність.
11. Якщо рівень спирту в трубці при  $k=0,8$  піднімається незначно, слід зменшити кут нахилу трубки до  $k=0,6$  або  $k=0,2$ , в залежності від максимальної величини вимірюваного тиску.

12. Встановивши мінімально можливий стан кута нахилу шкали, повернути триходовий кран праворуч до упору, остаточно відкоригувати нуль шкали, попередньо перевіривши стан приладу по рівнях, а потім приступити до вимірів тиску.

13. У всмоктуючому і нагнітальному повітроводах динамічний швидкісний тиск вимірюється однаково. Пневмометричні трубки, підключені до плюса чашки мікроманометра, вимірюють повний (загальний) тиск в повітропроводі. Трубка, підключена до «мінуса» чашки з'єднана з кінцем штуцера у верхній частині корпусу, вимірює статичний тиск. Таким чином, показання стовпчика спирту у вимірювальній скляній трубці є результатом алгебраїчного додавання двох тисків - загального і статичного і, за визначенням, є швидкісний (динамічний) тиск.

### **Фізичні основи застосування чашкових мікроманометрів зі змінним кутом нахилу мірної трубки**

Мікроманометр являє собою двоколінну трубку, заповнену рідиною. До обох колін приладу, за допомогою шлангів з гуми або іншого матеріалу підводяться тиски, різницю яких необхідно виміряти. Зазвичай одне з колін мікроманометра (бачок) робиться зі значно більшим поперечним перерізом, ніж інше (скляна трубка). Підвищений тиск підводиться до бачка манометра, знижений - до скляної трубки. При цьому рівень рідини в бачку знижується, а в скляній трубці - підвищується.

Позначимо підвищений тиск як  $p_1$ , а знижений –  $p_2$ , (при рівновазі), отримаємо:

$$\frac{p_1}{\gamma_m} - \Delta h = \frac{p_2}{\gamma_m} + a_n \sin \phi \quad (2.1)$$

де:  $\gamma_m = \gamma - \gamma_v$ ;

$\gamma$  — вага одиниці об'єму рідини в мікроманометрі (в порожнині);

$\gamma_v$  — вага (у порожнині) одиниці об'єму повітря, в якому тиски  $p_1$  та  $p_2$  змінюються;

$a_n$  — різниця рівнів рідини в скляній трубці, яка вимірюється за довжиною трубки від початкового (нульового) положення;

$\Delta h$  — переміщення рівня рідини в бачку від початкового (нульового) положення;

$\phi$  — кут, утворений віссю трубки манометра з горизонтом.

Отже, різниця тисків буде дорівнювати:

$$p_1 - p_2 = \left( a_n + \frac{\Delta h}{\sin \phi} \right) \sin \phi \gamma_m, \quad (2.2)$$

Зазвичай приймають  $\gamma_m = \gamma$ .

В формулі (2.1) величина  $a_n = (a - a_0)$ , де  $a$  та  $a_0$  відраховуються за шкалою на бічній поверхні вузького скляного коліна відповідно під час вимірювань і після проведення вимірювань.

Різниця тисків визначається зміною положення меніска рідини. При даній різниці тисків  $p_1 - p_2$  ця зміна буде тим більша, ніж менший кут нахилу трубки манометра  $\varphi$ . Таким чином, зменшення кута  $\varphi$  призводить безпосередньо до збільшення вимірюваної величини, тобто до підвищення точності відліку, а відповідно – до точності вимірювання. Однак це вірно тільки до певної межі; при  $\sin \varphi = 1/25$  і менше починають з'являтися помилки, обумовлені капілярними законами рідини, налитої у мікроманометр.

Крім того, підвищення точності відліку у прецизійних манометрах спеціальних типів досягається застосуванням оптичних пристроїв.

Якщо площу дзеркала рідини, налитої у бачок мікроманометра, позначити через  $F$  мм<sup>2</sup>, а площу поперечного перерізу скляної трубочки — через  $f$  мм<sup>2</sup>, то простий підрахунок об'єму рідини, витісненої з широкого коліна, та що увійшла в вузьке коліно, призводить до рівності:

$$\Delta h = \frac{F}{f} a_n \quad (2.3)$$

Так, наприклад, коли вісь бачка розташована вертикально, а діаметр його  $D=100$  мм, то при діаметрі трубочки  $d=7$  мм  $\Delta h$  складає 0,5% от  $a_n$ .

Для вимірюваної різниці тисків після підстановки в формулу (2.2) величини  $\Delta h$  отримаємо наступне співвідношення:

$$p_1 - p_2 = a_n \sin \varphi \gamma \left(1 + \frac{f}{F \sin \varphi}\right) \quad (2.5)$$

з якого видно, що величина  $\Delta h$  враховується введенням поправки  $K = \left(1 + \frac{f}{F \sin \varphi}\right)$ , що називається коефіцієнтом мікроманометра.

Введення коефіцієнта  $K$  дозволяє обмежитися тільки одним відліком, а саме - відліком величини  $a_n$ . При цьому помилка відліку зменшується у двічі.

Таким чином, робоча формула мікроманометра набуває вигляду:

$$p_1 - p_2 = (a - a_0) \sin \varphi \gamma K \quad (2.6)$$

Позначимо через  $\gamma_0$  питому вагу рідини в мікроманометрі для деякої певної температури  $t_0$ , яка заздалегідь визначається за допомогою ареометра. Якщо досвід проводиться при температурі  $t$  °С, то  $\gamma$  необхідно привести до температури, за якої проводяться вимірювання. Приведення відбувається за формулою:

$$\gamma = \frac{\gamma_0}{1 + \beta(t - t_0)}, \quad (2.7)$$

де  $\gamma_0$  – вага одиниці об'єму рідини в мікроманометрі за температури  $t_0 = 15$  °C;

$\gamma$  – те саме, при температурі досліджень  $t$ ;

$\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення рідини.

Для спирту при середніх температурах, близьких до нормальної,  $\beta = 0,0011$ , тому для отримання помилки у межах  $\gamma$  в 1%  $\Delta t = t - t_0$  повинно бути не менше 10 °C. За меншої різниці температур  $\Delta t$  температурною поправкою на зміну щільності рідини у манометрі можна знехтувати.

Перед тим як користуватись спільною формулою для мікроманометра (2.6), необхідно визначити в яких одиницях повинна бути виражена величина  $\gamma$  [див. формулу (2.7)], щоб можна було підставити в формулу виміряні за шкалою мікроманометра у міліметрах величини  $a$  та  $a_0$ , не переводячи їх в інші одиниці довжини.

Нахил вузької скляної трубочки мікроманометра, що характеризується величиною  $\sin \varphi$ , здійснюється або поворотом трубочки разом з бачком або тільки однієї трубочки при нерухомому бачку. В обох системах нахил трубочки або коліна, що вимірюється, може змінюватись. Положення трубочки фіксується на спеціальному кронштейні, причому кожний отвір кронштейна має цифровий індекс, що відповідає значенню  $\sin \varphi$ .

### Методика тарування рідинних мікроманометрів

Розрізняють *первинне* та *вторинне* тарування мікроманометра. Під первинним таруванням розуміють встановлення абсолютної ціни поділки приладу. Первинне тарування проводять зазвичай для еталонних приладів. Прийом первинного тарування — процедура підливу. Він складається з послідовного доливання в резервуар мікроманометра невеликих, чітко дозованих за об'ємом та вагою кількості рідини. Одночасно відраховується зміщення меніску рідини. Якщо площа поперечного перетину широкого коліна мікроманометра дорівнює  $F$ , то кількість рідини  $Q$ , що заливається у це коліно, підвищить рівень рідини на величину  $\Delta h = \frac{Q}{\gamma F}$ . Це підвищення еквівалентно додатковому тиску у вузькому коліні, що дорівнює:

$$\Delta p = \Delta h \gamma = \frac{Q}{F} a_n \sin \phi \left( 1 + \frac{f}{F \sin \phi} \right). \quad (2.8)$$

В результаті такого тарування визначається залежність дійсної висоти підйому рідини в трубці мікроманометра  $h_{\text{іст}}$  від різниці тиску  $\Delta p$  і коефіцієнт  $K = \frac{h_{\text{іст}}}{h_{\text{ман}}}$  у функції величини  $h_{\text{ман}}$  (висота стовпа рідини, що відраховується за шкалою мікроманометра).

Однак, більш поширене вторинне тарування. Воно застосовується в експлуатаційних умовах будь-яких лабораторій, що проводять вимірювання тиску. Робота №2 і полягає в проведенні подібного тарування. Вторинне тарування складається в порівнянні показань двох мікроманометрів, один з яких є еталонним, а другий тарується.

На рис 2.3. приведена схема установки для тарування мікроманометра. У даній роботі ставиться задача визначення коефіцієнта  $K$  для обчислення різниці тисків за формулою (2.6). Величини  $a$  та  $a_0$  відраховуються з мікроманометрів,

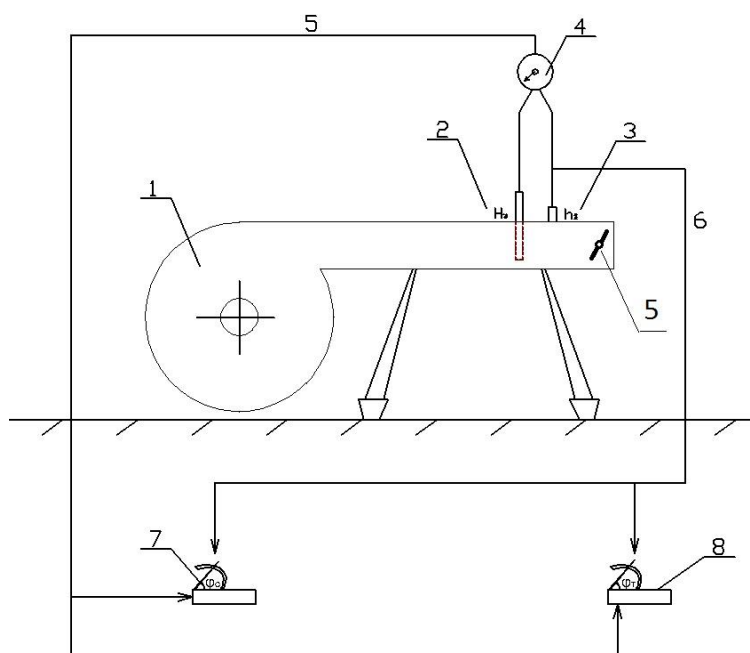


Рис. 2.3 Тарування мікроманометра (схема установки): 1 – аеродинамічний стенд; 2 – приймач повного тиску; 3 – приймач статичного тиску; 4 – багатоходовий клапан; 5 – шибер; 6 – сигнальні трубки; 7, 8 – мікроманометри зразковий та тарований

величини  $\varphi$  та  $\gamma$  заздалегідь відомі. Слід мати на увазі, що на показання мікроманометра впливає капілярність, яка враховується експериментально. Крім того, є ще одна причина, через яку коефіцієнт  $K$ , підрахований за формулою  $K = (1 + \frac{f}{F \sin \varphi})$ , не може відповідати дійсному значенню. Ця причина полягає в недостатній точності калібрування трубки мікроманометра (величина внутрішнього діаметра  $d$  може змінюватися по довжині трубки). Технічно, мікроманометр, що підлягає таруванню являє собою  $U$  – подібний манометр, розміщений на системі мікроманометра ММН без використання чашкової ємності

для спирту. Зчитування показань реалізуються за перепадом тиску у трубках з врахуванням кута нахилу рухомої платформи приладу.

Величину  $K$  визначають дослідним шляхом, порівнюючи показання еталонного мікроманометра  $K_e$ , з показаннями мікроманометра, що тарується. З цією метою обидва прилади під'єднуються, як показано на рис. 2.3 і їм передається однакова різниця тисків.

### Послідовність виконання вимірювань

У робочих формулах, всі величини, що відносяться до еталону, мають індекс «е»; величини, що відносяться до мікроманометру, що тарується, – індекс «т». З схеми установки видно як забезпечується рівність вимірюваної різниці тисків яка подається від датчиків повного та статичного тисків  $p - p_{st}$  для обох мікроманометрів ця різниця буде однаковою, а різниця показань має бути врахована при обробці результатів дослідження.

Перед початком тарування за допомогою гвинта багатоходового клапану  $\delta$  (див. рис. 1.5) виставляємо положення сигнальних ліній на позицію  $H_3$ , таким чином, під час вимірювань буде фіксуватися фактично динамічний напір у дослідному каналі:  $\Delta h_3 = H_3 - h_{st3}$ . Для зміни сигналу тисків на приладах регулятором обертів вентилятору дослідної ділянки  $l$  змінюється швидкість потоку повітря у каналі. Таким чином, створюють певний тиск, а після врівноваження стовпів рідини з мікроманометрів знімаються показання.

При виконанні роботи необхідно ретельно стежити за тим, щоб температура рідини в обох мікроманометрах була однаковою.

Оскільки кожен відлік за мікроманометром як еталонним, так і тим, що тарується, може мати свої випадкові помилки, то при визначенні величини  $K_T$  необхідно взяти кілька замірів. Для цього виконують вимірювання як у порядку збільшення швидкості потоку повітря (прямий хід), так і у порядку зменшення (зворотній хід). Середня величина  $K_T$  визначається за допомогою графіку (рис. 2.4), для чого отриману залежність представляють у вигляді:

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{(a - a_0)_e}{(a - a_0)_T} \quad (2.9)$$

Таким чином, коефіцієнт манометру, що тарується буде:

$$K_T = \operatorname{tg} \vartheta \cdot \operatorname{const}, \quad (2.10)$$

де:

$$\operatorname{const} = \frac{\gamma_e K_e \sin \phi_e}{\gamma_T \sin \phi_T},$$

будемо вважати:

$$\operatorname{const} = K_e.$$

Відліки за мікроманометром повинні проводитися в один і той саме момент часу, якщо спостерігаються будь-які коливання в положенні менісків рідини.

Діаграма випробування будується на підставі запису і обробки спостережуваних величин в протокольному бланку (у координатах  $(a - a_0)_e$  та  $(a - a_0)_T$ , як показано на рис. 2.4 у табл. 2.1).

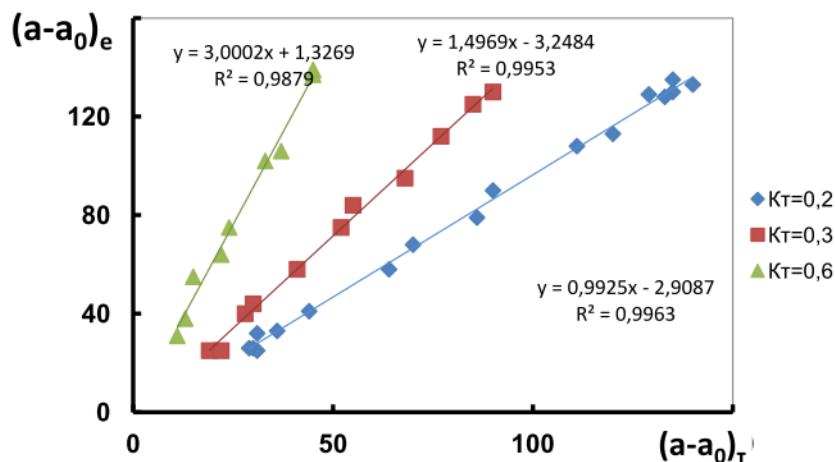


Рис. 2.4. Графічне визначення коефіцієнта  $K_T$  манометра, що тарується

Табл. 2.1 Результати вимірювань

Показник	$(a-a_0)_e$	$(a-a_0)_T$	$(a-a_0)_e$	$(a-a_0)_T$	$K_e$
№ з/п	Прямий хід		Зворотній хід		
1.					
2.					
3.					
4.					

Для визначення  $tg\vartheta$  графічно вручну рекомендується після проведення прямої лінії через експериментальні точки при невеликому їх розсіюванні намітити на цій прямій дві якнайдалі розміщені одна від одної точки з координатами  $x_1, y_1$  та  $x_2, y_2$  та потім визначити  $tg\vartheta$  як відношення різниці ординат точок до різниці їх абсцис. Або як показано на рисунку, за допомогою функції лінійної апроксимації, яка доступна у всіх спеціалізованих редакторах для обробки чисельних даних. Так  $tg\vartheta$  буде дорівнювати коефіцієнту  $a$  з рівняння прямої  $y=ax+b$  (рис. 2.4).

Результат визначення тарувального коефіцієнту  $K_T$  слід також виконати за нижче наведеною залежністю 2.11. Оскільки залежність між  $(\alpha - \alpha_0)_e$  та  $(\alpha - \alpha_0)_T$  має лінійний або близький до нього характер, то зручно скористатися таким виразом:

$$K_T = K_e \frac{\gamma_e \sin \phi_e \sum (a - a_0)^2}{\gamma_T \sin \phi_T \sum (a - a_0)_e (a - a_0)_T} \quad (2.11)$$

Вважатимемо, що мікроманометри мають однакову рідину і кут нахилу, тоді вираз 2.11 спроститься:

$$K_T = K_e \frac{\sum (a - a_0)^2}{\sum (a - a_0)_e (a - a_0)_T} \quad (2.12)$$

### Необхідна апаратура і матеріали:

1. Два мікроманометри, наповнені спиртом із заздалегідь визначеною величиною  $\gamma$ ; для одного з мікроманометрів повинна бути відома величина коефіцієнта мікроманометра  $K$ .
2. Можливість встановлення змінної різниці тисків з одночасною фіксацією показань
3. Гумові або ПВХ трубки для з'єднання мікроманометра з напоромірними датчиками.

### Робочі формули:

1.  $p_a - p_0 = (a - a_0) \sin \phi_3 \gamma_3 K_3$ ;
2.  $p_a - p_0 = (a - a_0) \sin \phi_T \gamma_T K_T$ ;
3.  $(a - a_0) \sin \phi_3 \gamma_3 K_3 = (a - a_0) \sin \phi_T \gamma_T K_T$ ;
4.  $K_T = \frac{(a - a_0)_3}{(a - a_0)_T} \text{const} = \text{tg} \vartheta \text{const}$ ;
5.  $\text{const} = \frac{\sin \phi_3 \gamma_3 K_3}{\sin \phi_T \gamma_T}$ .

### Порядок проведення роботи:

1. Ознайомитися зі схемою і конструкцією мікроманометрів.
2. Встановити еталонний мікроманометр, та той, що тарується, приєднати їх до датчиків напору з затискачем і перевірити герметичність всіх з'єднань.
3. Провести вимірювання стовпців спирту в межах всієї шкали відліку.
4. Обробити експериментальний матеріал і побудувати графічну залежність:  $(a - a_0)_T = f(a - a_0)_e \cdot \bullet$

### Контрольні запитання

1. Які конструкції манометрів існують; принцип їх дії?
2. Які особливості первинного та вторинного методів тарування мікроманометрів?
3. Чи можна визначити абсолютні величини двох тисків, якщо відома їх різниця?
4. Що називається надлишковим тиском?
5. Чи може бути надлишковий тиск негативним?

6. Поняття про статичний, динамічний і повний тиск. Як вони визначаються і вимірюються?
7. Призначення і пристрій мікроманометра ММН.
8. Як встановлюється нуль шкали в вимірювальній трубці?
9. Пристрій і робота триходового крана?
10. Які тиски вимірюються за допомогою мікроманометра ММН і як?
11. Як визначити витрату повітря в повітроводі з використанням ММН.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

### Повірка електронного дифманометру

Мета роботи – визначення придатності до застосування електронного портативного диференційного манометру шляхом зіставлення показань зі зразковим рідинним мікроманометром типу ММН. У процесі виконання вимірювань студенти мають отримати навички застосування сучасних електронних приладів у комбінації з приймачами повітряного тиску та освоєння особливостей їх експлуатації при налагодженні тягло дуттьового обладнання теплоенергетичного устаткування.

#### Загальні відомості та характеристика вимірювального обладнання

Зручними і надійними сучасними засобами визначення диференційного та манометричного тисків є цифрові портативні дифманометри, вибір та характеристики яких дозволяють їх широко застосовувати для широкого кола технічних задач у тому числі теплоенергетичних. У якості дослідного вимірювального приладу обрано Дифманометр цифровий AZ-82012 з діапазоном показань  $\pm 703$  мм вод. ст. та роздільною здатністю 1 мм (рис. 2.1).



Рис. 2.1 Дифманометр портативний цифровий AZ-82012

Діапазон вимірювання для обраних одиниць з роздільною здатністю приведено у табл. 2.1

Таблиця 2.1 Діапазон вимірювання

Одиниця тиску	Діапазон вимірювання	Роздільна здатність
Psi	0...± 1,000	0,001
кПа	0...± 6,89	0,01
мм рт. ст.	0...± 51,7	0,1
кг/см <sup>2</sup>	0...± 0,070	0,001
мбар (hpa)	0...± 68,9	0,1
бар	0...± 0,069	0,00 1
дюймів Н <sub>2</sub> О	0...± 27,68	0,01
мм вод. ст.	0...± 703	1
дюйм Hg	0...± 2,036	0,001
футів Н <sub>2</sub> О	0...± 2,307	0,001
унцій/дюйм <sup>2</sup>	0...± 16,00	0,01

Основні технічні характеристики наведені у таблиці 2.2

Таблиця 2.2 Технічні характеристики досліджуваного дифманометру

Точність	± 1,0 % повного діапазону для 10-30 °С
Відгук	0,5 с
Компенсований	10 ~ 30 °С
Температурний діапазон	32,5 x 54 мм
Розмір дисплея	температура: 0 ~ 50,0 °С, вологість: < 80 %
Умови експлуатації	температура: -20 ~ 50,0 °С, вологість: < 90 %
Умови зберігання	169 x 78,3 x 34,4 мм
Габарити	200 г

На рис 2.2. приведена схема установки для проведення вимірювань.

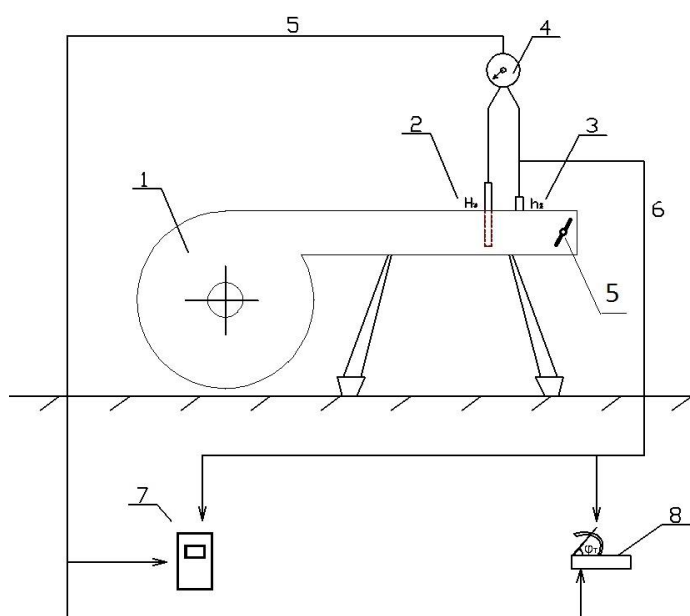


Рис. 2.2 Повірка електронного мікроманометра (схема установки): 1–аеродинамічний

стенд; 2–приймач повного тиску; 3–приймач статичного тиску; 4–багатоходовий клапан; 5–шибер; 6–сигнальні трубки; 7 – електронний дифманометр, 8 – зразковий мікроманометр

У даній роботі ставиться задача визначення відповідності метрологічних характеристик електронного мікроманометра шляхом порівняння його показань з перепадом тиску на рідинному мікроманометрі типу ММН. Сигнал з датчика тиску на аеродинамічному стенді подається через багатоходовий клапан на обидва прилади.

### Послідовність виконання вимірювань

Перед початком тарування за допомогою гвинта багатоходового клапану 8 (див. рис. 1.5) виставляємо положення сигнальних ліній на позицію  $H_3$ , таким чином, під час вимірювань буде фіксуватися фактично динамічний напір у дослідному каналі:  $\Delta h_3 = H_3 - h_{st3}$ . Для зміни сигналу тисків на приладах регулятором обертів вентилятору дослідної ділянки  $l$  змінюється швидкість потоку повітря у каналі. Таким чином, створюють певний тиск, а після врівноваження стовпа рідини з мікроманометрів знімаються показання.

Оскільки кожен відлік за мікроманометром як еталонним, так і тим, що тарується, може мати свої випадкові помилки, то необхідно взяти кілька замірів. Для цього виконують вимірювання як у порядку збільшення швидкості потоку повітря (прямий хід), так і у порядку зменшення (зворотній хід). Результати заносяться у таблицю 2.3.

Таблиця 2.3 Результати вимірювання тиску

	$(a-a_0)_e$	K	$\Delta H$ електр	$K_{\text{електр}}/\Delta_{\text{доп}}$	$\Delta, \text{мм}$	Відносна похибка $\delta, \%$	Нормована похибка $\gamma, \%$
1.	130	0,2	26	1,0/7 мм	0	0	0,000
2.	84	0,2	17		0,2	1	0,028
3.	58	0,2	12		0,4	3	0,057
4.	40	0,2	8		0	0	0,000
5.	25	0,2	5		0	0	0,000
6.	25	0,2	7		2	40	0,284
7.	44	0,2	8		0,8	9	0,114
8.	75	0,2	15		0	0	0,000
9.	95	0,2	19		0	0	0,000
10.	112	0,2	22		0,4	2	0,057
11.	125	0,2	25		0	0	0,000

За результатами вимірів необхідно зробити порівняння максимально допустимого відхилення електронного приладу (за паспортом) з показаннями зразкового манометру та зробити відповідні висновки.

### Необхідна апаратура і матеріали:

1. Два мікроманометри, електронний та рідинний лабораторний.
2. Можливість встановлення на стенді змінної різниці тисків з одночасною фіксацією показань
3. Гумові або ПВХ трубки для з'єднання мікроманометрів з напоромірними датчиками.

### Робочі формули:

1.  $\Delta H_{\text{рідинний}} = (a - a_0)K$ , мм ;
2.  $\Delta = |\Delta H_{\text{електр}} - \Delta H_{\text{рідинний}}|$  ;
3.  $\delta = \Delta / \Delta H_{\text{рідинний}} \cdot 100\%$  ;
4.  $\gamma = \Delta / X_{\text{норм}} \cdot 100\%$  , де  $X_{\text{норм}}$  додатній діапазон шкали приладу (за паспортом).

### Порядок проведення роботи:

1. Ознайомитися зі схемою і конструкцією мікроманометрів.
2. Встановити еталонний мікроманометр, та той, що тарується, приєднати їх до датчиків напору з затискачем і перевірити герметичність всіх з'єднань .
3. Провести вимірювання в межах усієї шкали відліку тарованого манометру.
4. Обробити експериментальний матеріал і зробити висновки.

### Контрольні запитання

1. Які конструкції манометрів існують; принцип їх дії?
2. У чому різниця відносної та приведеної похибки приладу?
3. Наведіть умови щодо класів точності приладів при проведенні процедури повірки?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

### Визначення коефіцієнта поля швидкісних напорів в робочій частині аеродинамічної труби

Мета роботи – визначення ступеня нерівномірності потоку повітря за величиною і напрямом швидкостей у кожному перерізі робочої ділянки. Результат потрібно представити кривою розподілу коефіцієнта поля  $\mu$  швидкісних напорів в обраному перерізі робочої частини аеродинамічної труби.

#### Загальні відомості

При вимірюванні швидкісного напору, тиску у потоці, а також відхилення потоку відносно повздовжньої вісі аеродинамічної труби (виміри проводяться вздовж обраної прямої у поперечному перетині аеродинамічної труби), тоді крива, що зображує розподіл цих величин уздовж обраної прямої і буде характеризувати поле швидкісних напорів і відхилення потоку у вертикальній або горизонтальній площині. Коефіцієнт поля швидкісних напорів є мірою відхилення величин місцевих значень швидкісного напору, виміряних вздовж деякої вісі перпендикулярної до потоку, відносно середнього значення швидкісного напору:

$$\mu_{точ} = \frac{\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{точ}}{\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{сер}}, \quad (3.1)$$

де:

$$\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{сер} = q_{сер.пер} = \frac{\sum_1^n q_{пер}}{n}, \quad (3.2)$$

або

$$\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{сер.к.нас} = \frac{\sum_1^n q_{к.нас}}{n}. \quad (3.3)$$

Частіше величину  $\mu$  визначають, як відношення швидкісного напору в обраній точці до швидкісного напору у фіксованій точці знаходження контрольного насадку, або до швидкісного напору, виміряного за перепадом тиску. Тоді:

$$\mu_{точ} = \frac{\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{точ}}{\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{к.нас}} \quad (3.4)$$

$$\text{або } \mu_{точ} = \frac{\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{точ}}{\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{пер}}. \quad (3.5)$$

Тут індекси величин вказують, що вони були визначені або в даній точці («точ»), або за допомогою контрольного насадку («к.нас»), або методом перепаду тиску («пер»). Індекс «сер» відповідає середньому значенню швидкісного напору. Середнє значення коефіцієнту поля робочої частини труби в області знаходження моделі буде:

$$\mu = \mu_{сер} = \frac{\sum_1^n \mu_{точ}}{n}. \quad (3.6)$$

В умовах лабораторного дослідного стенду середній швидкісний напір  $\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{пер} = \left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{інт.тр.}$  може бути визначений за допомогою інтегруючої трубки (Дод. А)[4].

Крім поля швидкісних напорів схожим чином можуть бути визначені поле тиску, поле напрямку потоку і т.п. При проведенні вимірювань тарований насадок встановлюється в робочій частині аеродинамічної труби так, щоб його передній кінець розташувався в досліджуваній ділянці поля (у площині  $yOz$ ).

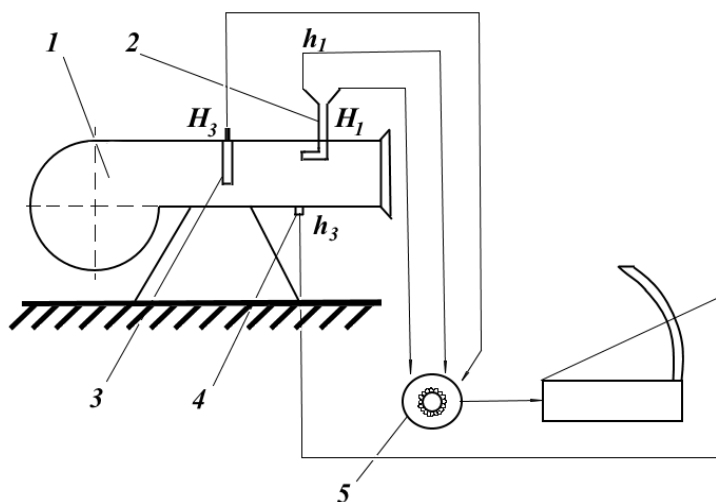


Рис. 3.1. Схема комутації датчиків тиску з вторинним приладом): 1 – аеродинамічний стенд; 2 – ППТ на координатнику; 3 – приймач повного тиску (інтегруюча трубка); 4 – приймач статичного тиску; 5 – багатоголовий клапан

Насадок переміщується уздовж прямої осі у або  $z$ , для круглої труби ця пряма буде одним з її діаметрів. Крок проведення вимірювань напорів зменшується ближче до стінки повітропроводу. На осі  $i$  у центральній частині труби крок 10 мм, ближче до стінок – 5 мм, 1-2 мм біля стінок, (рис. 3.1, 3.2). Насадок називається насадком поля і з'єднаний з диференціальним мікроманометром. За допомогою цих датчиків можна виміряти швидкісний напір у кожній точці поля певного перерізу. Так як визначення місцевих швидкостей поля труби не може бути проведено при такому способі у всіх намічених точках одночасно, то може виявитися, що вони будуть відповідати різним значенням швидкості набігаючого потоку, тоді їй необхідно буде визначати при кожному відліку швидкості поля. Для цього використовують метод визначення швидкості повітряного потоку в аеродинамічній трубі приймачем тиску або за перепадом тиску, як це показано на рис. 3.2. Величини швидкості поля  $V_{\text{пер}}$  у данному поперечному перерізі труби і швидкості за перепадом  $V_{\text{роз}}$  потрібно вираховувати за методикою у Лабораторній роботі №5 цих методичних вказівок.

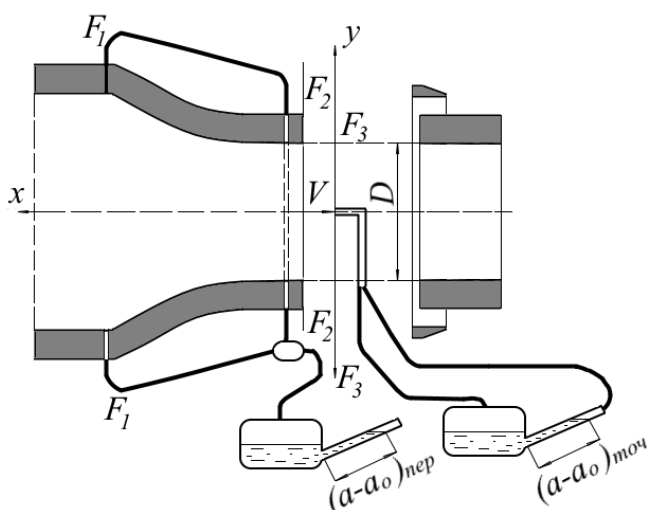


Рис. 3.2. Визначення коефіцієнта поля швидкісних напорів в робочій частині аеродинамічної труби зі звуженням прохідного перетину каналу (схема установки)

Послідовністю вказаних вище формул визначається порядок запису відрахованих величин у протоколі досліду. Експериментальна діаграма досліду являє собою криву

$$\mu_{\text{точ}} = f(\bar{l}), \quad (3.7)$$

$$\bar{l} = \frac{l}{D_{\text{тр}}}, \quad (3.8)$$

де  $l$  – відстань отвору насадка від стінки аеродинамічної ділянки, на якій розташовується початок координат системи відліку.

$D_{\text{тр}}$  – діаметр труби для круглого перерізу робочої частини, або довжина сторони (у випадку іншої форми перерізу робочої частини).

При визначенні знаку величини  $l$  мається на увазі, що система координат – права. Діаграма (рис. 3.3) будується у довільному, але зручному для читання масштабі. Для робочого каналу висота каналу становить 96 мм.

Таким чином, можна отримати коефіцієнт поля швидкісних напорів  $\mu$  у перерізах  $F_1$ ,  $F_2$  (див. рис. 3.2). У тому випадку, коли значення  $\mu_{\text{пер}}$  невідоме, у формулу швидкісного напору  $q_{\text{пер}}$  коефіцієнт  $\mu_{\text{пер}}$  не вводиться. У результаті буде отриманий коефіцієнт поля швидкісних напорів  $\mu$  у перерізі  $F_3$ .

У випадку, якщо коефіцієнт поля  $\mu$  не суттєво відрізняється від одиниці, його можна визначити за формулою:

$$\mu = \mu_{\text{сер}} = \frac{1 + \sum_{i=1}^n \Delta\mu_{\text{точ}}}{n}, \quad (3.9)$$

де  $\Delta\mu_{\text{точ}} = \mu_{\text{точ}} - 1$ , а  $n$  – число точок.

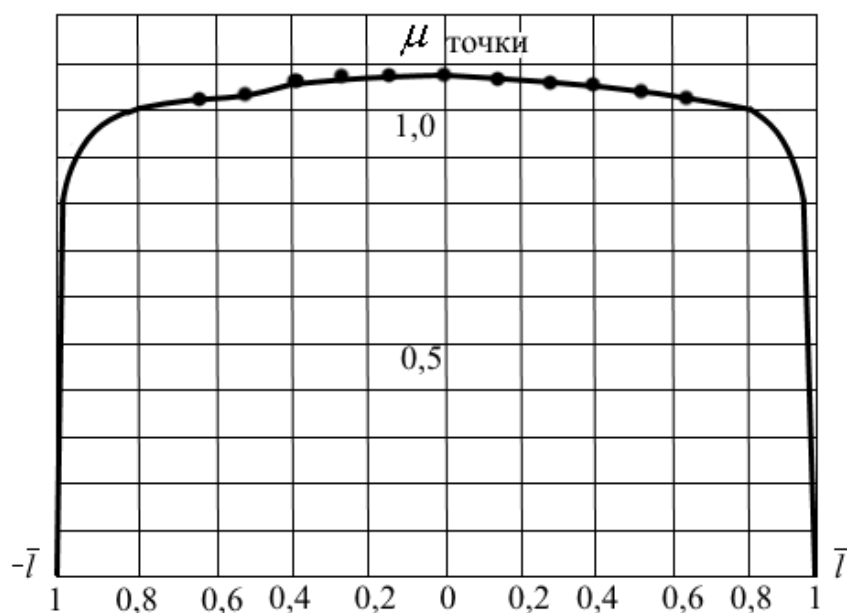


Рис. 3.3. Графік значень коефіцієнта поля швидкісних напорів в заданому поперечному перерізі круглої труби

Останній спосіб дає більш точні результати визначення коефіцієнта поля труби.

### Послідовність виконання вимірювань

Динамічний напір у точці динамічної труби  $\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{\text{точ}}$  будемо визначати різницею параметрів  $H_1$  та  $h_{\text{ст1}}$  за допомогою тарованого насадку. Вимірювання проводяться в обраному перетині дослідної ділянки при зміні орієнтації чутливого елемента за допомогою

координатника (рис. 1.5, поз. 2). Після кожного вимірювання за допомогою гвинта багатоходового клапану 8 (див. рис. 1.5) виставляємо положення сигнальних ліній на позицію  $H_3$  (інтегруюча трубка див. Дод. А), таким чином, під час вимірювань буде фіксуватися фактично динамічний напір у дослідному каналі:  $\Delta h_3 = H_3 - h_{st3}$ . Цей сигнал будемо вважати рівним параметру  $q_{\text{сер.пер}}$ . Показання з мікроманометрів знімаються тільки після врівноваження рівня стовпа рідини.

Результати заносяться у таблицю 3.1.

Таблиця 3.1

Параметр Положення по осі 0Z, мм	$H_1$	$h_{st1}$	$H_3 \cdot h_{st3}$	
	Робочий ППТ		ППТ-інтегруюча трубка	
1				
2				
3				
5				
10				

За результатами вимірювань будується діаграма поля швидкісних напорів рис. 3.4 та розраховується значення  $\mu_{\text{сер}}$  за відношеннями 3.6 та 3.9.

### Необхідна апаратура та матеріали

1. Мікроманометр з відомими значеннями  $\gamma$  і  $K$ .
2. Насадок для визначення швидкостей потоку в обраному перерізі труби (насадок поля).
3. Координатник для переміщення насадку поля.
4. Трубки, трійники та інші деталі для з'єднання насадку поля та інтегруючої трубки у каналі з мікроманометром у розсічку з багатоходовим клапаном.
5. Контрольний насадок у випадку визначення швидкості за допомогою вимірювання швидкісного напору.

### Робочі формули

$$\mu_{\text{сер}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu_{\text{точ}};$$

$$\mu_{\text{точ}} = \frac{q_{\text{точ}}}{q_{\text{інт}}} = \frac{\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{\text{точ}}}{\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{\text{інт}}} \text{ або } \mu_{\text{точ}} = \frac{q_{\text{точ}}}{q_{\text{к.нас}}} = \frac{\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{\text{точ}}}{\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{\text{к.нас}}};$$

$$q_{\text{точ}} = (a - a_0)_{\text{точ}} \cdot K_{\text{точ}} \cdot \xi_{\text{точ}};$$

$$q_{\text{інт}} = (a - a_0)_{\text{інт}} K_{\text{інт}} \cdot \xi_{\text{інт}};$$

$$q_{\text{к.нас}} = (a - a_0)_{\text{к.нас}} \cdot K_{\text{к.нас}} \cdot \xi_{\text{к.нас}}.$$

Слід врахувати, що  $\xi_{\text{інт}}, \xi_{\text{к.нас.}} = 1,0$ ,  $\xi_{\text{точ}} = 1,1$

### Порядок проведення роботи

1. Ознайомитися зі схемою установки.
2. Перевірити установку інтегруючої трубки, правильність її розміщення у потоці та герметичність з'єднань всіх імпульсних ліній на вимірювальній ділянці.
3. Встановити насадок поля на координатнику та з'єднати його з багатоходовим клапаном.
4. Виконати експеримент.
5. Опрацювати результати досліду та побудувати графік  $\mu_{\text{точ}} = f(\bar{l})$ .

### Контрольні питання

1. Чи може коефіцієнт поля труби  $\mu$  бути меншим одиниці?
2. Як буде виглядати поле швидкостей у поперечному розрізі робочої частини аеродинамічної труби?
3. Чому буде дорівнювати статичний тиск у відкритій частині робочої частини аеродинамічної труби?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

### Тарування насадку приймача повітряного тиску

Мета роботи – визначення коефіцієнту  $\xi$  насадку приймача повітряного тиску та визначення чутливості щодо кута його установки відносно потоку, що набігає.

Результати роботи мають бути представлені двома діаграмами, одна з яких дозволяє визначити коефіцієнт ППТ, що тарується, а інша – визначити ступінь чутливості по відношенню до значення кута установки відносно потоку повітря.

#### Загальні відомості

Коефіцієнт ППТ (насадка)  $\xi_T$  визначається дослідним шляхом, при безпосередньому порівнянні показань перепадів тиску дослідного приймача та зразкового, які мають бути зафіксовані в однаковому перерізі повітряного каналу з ціллю отримання достовірних даних (рис. 4.1).

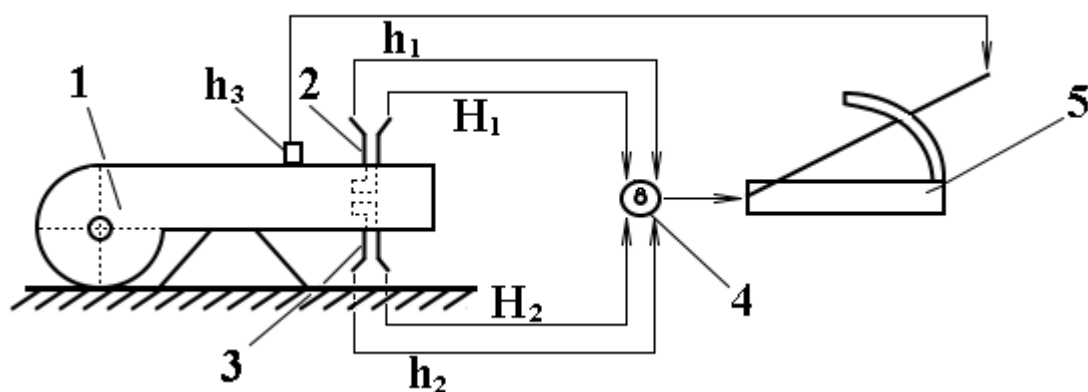


Рис. 4.1. Тарування насадку (схема установки). 1 – аеродинамічний стенд, 2 – насадка, що тарується, 3 – зразкова трубка Піто, 4 – багатоходовий клапан, 5 – дифманометр

Для одного з насадків (еталонного) коефіцієнт  $\xi_e$  відомий заздалегідь, а для того що тарується, його потрібно визначити  $\xi_T$ . При проведенні вимірювань, є можливість розміщення обох насадків у різних достатньо віддалених точках аеродинамічної труби. Але слід розуміти, що у робочому потоці дослідної ділянки швидкості розподілені нерівномірно, тому відлік швидкісного напору за обома насадками буде відповідати фактично неоднаковим значенням перепаду на мікроманометрі. Таким чином, еталонний насадок слід розмістити у одному перпендикулярному до напрямку руху потоку перерізі, для якого відношення середнього швидкісного напору  $\frac{\rho V^2}{2}$  до швидкісного напору у тому перерізі труби, де

потрібно розмістити отвір тарованого насадку, є відомим і дорівнює величині  $\mu$  яка називається коефіцієнтом точки поля.

У робочих формулах, що приведені нижче, величина  $\mu$  введена множником при швидкісному напорі, що вимірюється еталонним насадком та його мікроманометром. З формули

$$\xi_T = \frac{(a - a_0)_e \cdot \sin \varphi_e \cdot \gamma_e \cdot K_e \cdot \xi_e \cdot \mu}{(a - a_0)_T \cdot \sin \varphi_T \cdot \gamma_T \cdot K_T} = \operatorname{tg} \beta \operatorname{const} \quad (4.1)$$

видно, що коефіцієнт тарованого насадку  $\xi_T$  являє собою добуток постійної величини  $\operatorname{const}$  на тангенс кута  $\beta$  між віссю абсцис та прямою лінією. За умови використання одного мікроманометра з багатоходовим клапаном, вираз 4.2 спроститься:

$$\xi_T = \frac{(a - a_0)_e \cdot \xi_e \cdot \mu}{(a - a_0)_T} = \operatorname{tg} \beta \cdot \xi_e \cdot \mu. \quad (4.2)$$

Тоді, на експериментальній діаграмі через побудовані по координатам:  $(a - a_0)_e$  – ординатою та  $(a - a_0)_T$  – абсцисою отримаємо (рис. 4.2).

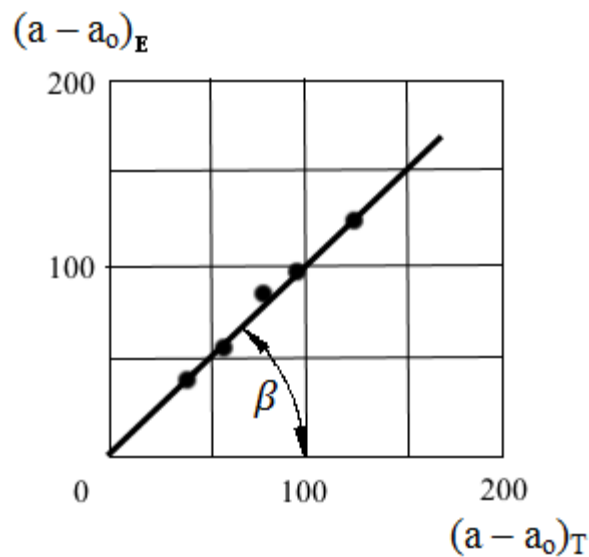


Рис. 4.2. Графічне визначення коефіцієнта  $\xi_T$  насадку, що тарується

Слід зазначити, що використання спрощеної схеми зменшує похибку неоднозначності вимірювань двома різними мікроманометрами та дозволяє знехтувати додатковими параметрами, які обов'язково враховуються при вимірюваннях (густина рідин, кути нахилу мірної трубки и т.п.). З іншої сторони, дещо збільшується час виконання досліджень, за рахунок інерційності датчиків та необхідності фіксації 4-ох параметрів на одному приладі замість 2-ох.

В якості іншого методу визначення коефіцієнта  $\xi_T$  тарованого насадку може бути використаний метод знаходження коефіцієнта манометра  $K_T$  за залежністю (за умови використання окремого мікроманометра до кожного ППТ):

$$\xi_T = \xi_e \frac{\gamma_e \cdot K_e \sin \varphi_e \cdot \sum (a - a_0)_e^2}{\gamma_T \cdot K_T \cdot \sin \varphi_T \cdot \sum (a - a_0)_e (a - a_0)_T}. \quad (4.3)$$

За умов дослідного стенда, вираз 4.3 спроститься наступним чином:

$$\xi_T = \xi_e \frac{\sum (a - a_0)_e^2}{\sum (a - a_0)_e (a - a_0)_T}. \quad (4.4)$$

У даному випадку коефіцієнт  $\mu$  не вводять, рахуючи, що швидкості в зоні розташування насадків однакові. Це можливо, якщо насадки знаходяться в одній поперечній площині потоку і, крім того, близько один від іншого, але при умові виключення взаємного впливу.

З ціллю запобігання великого розсіювання експериментальних точок при досліді необхідно точно проводити миттєвий відлік за обома датчиками тиску для кожного значення швидкості  $V$  у робочій частині аеродинамічної труби.

*Друга частина* роботи складається з визначення ступеня залежності показань тарованого насадку від орієнтації його головки відносно напрямку руху потоку *повітря*, яка являється практично важливою властивістю датчиків цього типу.

Для зміни кута розміщення тарованих насадок за допомогою спеціального механізму повертають на різні кути по відношенню до вісі труби, рахуючи при цьому коефіцієнт  $\xi_T$  при куті повороту відомим на основі першої частини роботи. При цьому еталонний насадок має лишатись нерухомим. Щоб мати можливість вірно відрахувати кути  $\alpha$  по лімбу, бажано початкове налаштування тарованого насадку провести за допомогою рівня чи кутоміра.

Швидкість  $V$  у робочій частині аеродинамічної труби фактично не є постійною, так як частота обертання робочого колеса відцентрового вентилятора під час досліді безперервно коливаються. Тому результати слід приводити до постійної швидкості, для чого необхідно фіксувати вимірювані швидкісні напори з насадків максимально швидко без затримок у часі. У результаті досліді по записам у протокольному бланку будується крива

$\frac{(a - a_0)_T}{(a - a_0)_e} \cdot \frac{\xi_T}{\mu} \cdot 100\% = \bar{q}$  як функція кута  $\alpha$ . Приблизний вигляд такої кривої приведений на рис. 4.3, де значення  $\bar{q}$  подані у відсотках.

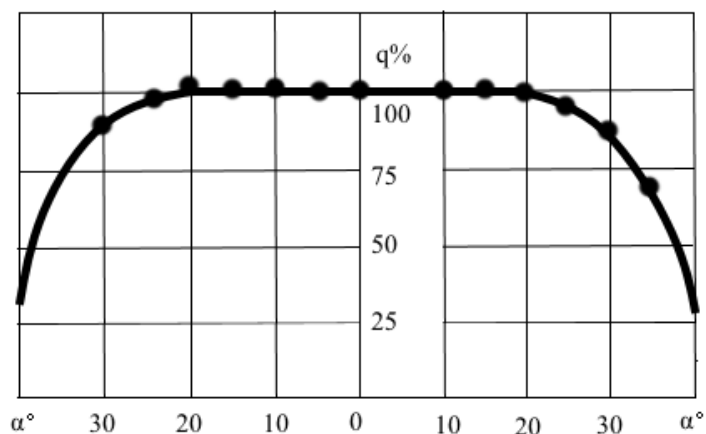


Рис. 4.3. Графік відліку при таруванні насадку під різними кутами відносно вісі каналу  
 Найчастіше насадки ППТ не чутливі до деякої не співвісності (до 20-25°), що і спостерігається на приведеному вище графіку.

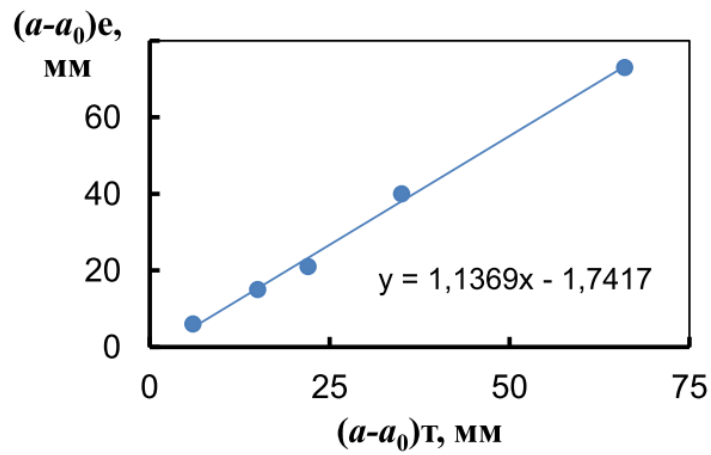
### Послідовність виконання вимірювань

У зв'язку з особливостями комутації мікроманометрів з датчиками тиску, необхідно при обробці результатів врахувати певні особливості схеми вимірювальної установки.

Для *першої* частини роботи послідовність вимірювань буде такою. На різних режимах роботи вентилятора аеродинамічного стенду (поз. 1 рис. 1.5) проводиться послідовна фіксація повного та статичного напорів з двох досліджуваних ППТ:  $H_1$  та  $h_{st1}$ ,  $H_2$  та  $h_{st2}$  відповідно. Індекс «2» відповідає зразковій трубі Піто, а індекс «1» – тарованій трубі Піто. Вимірювання кожного сигналу проводиться шляхом перемикання на вхід мікроманометру відповідних вимірювальних сигналів з датчиків багатходовим клапаном (поз. 8 рис. 1.5). Таким чином, різниця  $(a - a_0)$  фактично становитиме значення динамічного напору  $\Delta h = H - h_{st}$ . За результатами вимірювань заповнюється таблиця 4.1

Таблиця 4.1 Результати тарування ППТ

$(a - a_0)$	$H_1$	$h_{st1}$	$H_2$	$h_{st2}$
Режим	ППТ, що тарується		Зразковий ППТ	
1.				
2.				
3.				

Рис. 4.3 Графічне визначення коефіцієнту  $\zeta_\tau$ 

Таким чином,  $\zeta_\tau$  визначається графічно і перевіряється за залежністю 4.4. За умови правильності розрахунків, різниця значень коефіцієнта не має перевищувати 5%.

Визначення впливу кута розміщення виконується при сталій швидкості потоку повітря. Аналогічно до попередньої частини роботи виконуються вимірювання статичних та повних напорів з двох ППТ шляхом вибору на багатоходовому клапані шуканої величини. За умови сталої роботи вентилятору, показання зразкового датчика ( $H_2$  та  $h_{st2}$ ) мають залишатися без змін, а напори з тарованого, при зміні кута  $\varphi$  мають також змінюватись. Вимірювання слід виконати для кутів розташування у діапазоні  $0^\circ \dots 35-40^\circ$ . Обробка даних та побудова графічної залежності виконується після заповнення результатів вимірювань у таблицю 4.2:

Таблиця 4.2 Визначення впливу кута розміщення на точність вимірювання динамічного напору ППТ

$(a - a_0)$	$H_1$	$h_{st1}$	$H_2$	$h_{st2}$
Кут $\varphi$	ППТ, що тарується		Зразковий ППТ	
$0^\circ$				
$10^\circ$				
$20^\circ$				
$30^\circ$				
$40^\circ$				

З врахуванням отриманих результатів та попередніх досліджень ( $\zeta_\tau$  та  $\mu$ ) будується графік як на рис. 4.4.

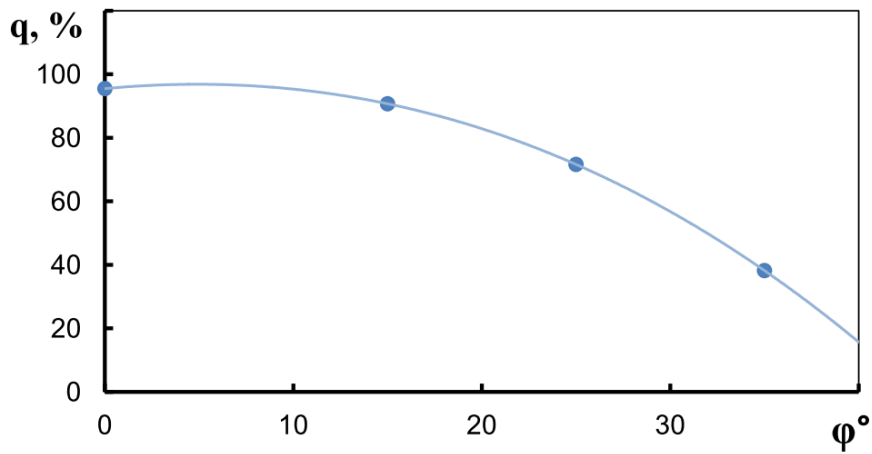


Рис. 4.4 Вплив кута установки приймача на точність визначення динамічного напору

### Необхідна апаратура та матеріали

1. Рідинний лабораторний мікроманометр типу ММН.
2. Еталонний насадок з відомим значення коефіцієнта  $\xi_e$ .
3. Насадок, що тарується, з координатником та лімбом для зміни просторової орієнтації по відношенню до осі аеродинамічної ділянки.
4. Трубки для з'єднання насадків ППТ з мікроманометром.

### Робочі формули

$$\xi_T = \frac{(a - a_0)_e \cdot \xi_e \cdot \mu}{(a - a_0)_T} = \operatorname{tg} \beta \cdot \xi_e \cdot \mu$$

$$\xi_T = \xi_e \frac{\sum (a - a_0)_e^2}{\sum (a - a_0)_e (a - a_0)_T}$$

$$\bar{q} = \frac{(a - a_0)_T}{(a - a_0)_e} \cdot \frac{\xi_T}{\mu} \cdot 100\%$$

### Порядок проведення роботи

1. Ознайомитись зі схемою та конструкцією приймачів повітряного тиску.
2. Скласти схему встановлення насадків в аеродинамічній трубці.
3. Встановити насадки відносно напрямку потоку труби.
4. Провести дослід зі зміною швидкості при незмінному встановленні насадку, що тарується.
5. Провести другий дослід при постійній швидкості і змінних кутах встановлення насадку, що тарується.

6. Опрацювати матеріали дослідів і побудувати графіки:  $(a - a_0)_T = f(a - a_0)_e$  і  $q = f(\varphi)$ .

### Контрольні питання

1. Які конструктивні форми мають приймачі повного і статичного тисків при вимірюваннях у дозвуковому та понадзвуковому потоках?
2. Як теоретично можна уявити собі картину обтікання насадку (приймача тиску) при сферичній формі закруглення переднього кінця?
3. Як приєднується насадок до мікроманометру?
4. Який вплив форми насадку на чутливість насадку до кутів скосу потоку?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

### Визначення швидкості і витрати технологічних газів у газоходах

**Мета роботи** – ознайомлення з методикою вимірювання швидкості руху потоку повітря та його витрати у повітропроводах різного поперечного перетину за допомогою приймачів повітряного тиску з мікроманометрами та врахуванням впливу вологості і стисливості повітря.

#### Теоретичні відомості та методика проведення вимірювань

У лабораторній роботі розглядається метод визначення швидкості і витрати за допомогою пневмометричних трубок і мікроманометрів типу ММН -2400. На паливоспоживаючому обладнанні даний метод може бути застосований для вимірювання як потоку чистого повітря так і для вимірювання параметрів газопилових потоків, що відходять від стаціонарних джерел забруднення у газоходах. Метод рекомендується для вимірювання швидкості газу у газоходах від 4 м/с і більше. При вимірюваннях сумішей газів (наприклад продуктів спалювання органічного палива) у розрахунках необхідно врахування склад для визначення густини газу.

Відомо, що швидкості газу у різних точках перерізу газоходу неоднакові, тому необхідно попередньо знайти коефіцієнт розподілу швидкостей по перетину газоходу  $\mu$ , який представляє собою відношення середньої швидкості газу в газоході до швидкості на осі (див. Лаб. роб. № 3). Проте, для визначення середньої швидкості на практиці, часто газохід

круглого перетину умовно розбивають на кілька концентричних кілець (рис. 5.1, а). Заміри швидкості бажано виконувати одночасно в даній точці перерізу газоходу і на його осі.

Для вимірювання тиску і швидкостей руху повітря у повітропроводах (каналах) повинні бути обрані ділянки з розміщенням робочих перетинів на відстані не менше шести гідравлічних діаметрів  $D_h$  за місцем збурення потоку (відводи, шибери, діафрагми і т. п.) і не менше двох гідравлічних діаметрів перед ним.

При відсутності прямолінійних ділянок необхідної довжини допускається розташування мірного перетину в місці, що поділяє обрану для вимірювання ділянку у відношенні 3:1 в напрямку руху повітря.

Гідравлічний діаметр визначається за формулою:

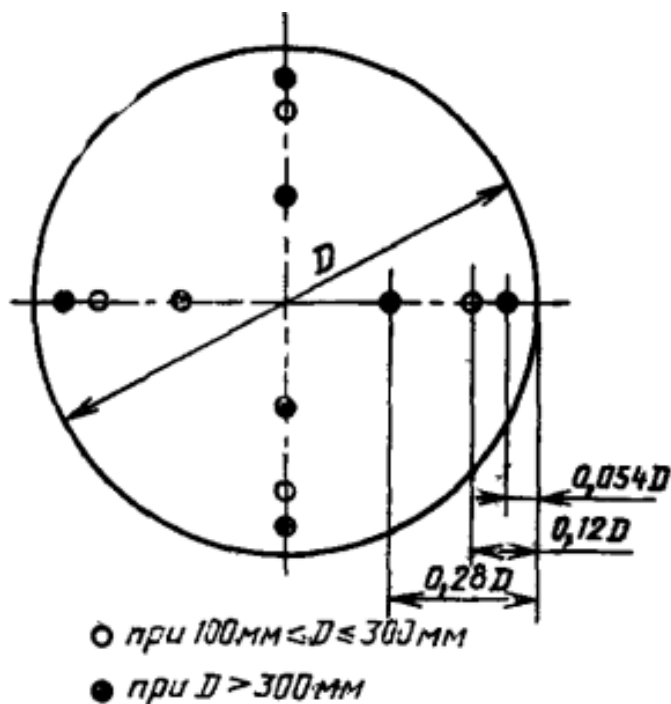
$$D_h = \frac{4F}{P}, \quad (5.1)$$

де  $F$ ,  $P$  - площа та периметр перетину.

Допускається розміщувати перетин для вимірювань безпосередньо в місці раптового розширення або звуження потоку. При цьому розмір мірного перетину приймають відповідним найменшому перетину каналу.

Координати точок вимірювань тиску і швидкостей, а також кількість точок визначаються формою і розмірами мірного перетину за рис. 5.1 а, б. Максимальне відхилення координат точок вимірювань від зазначених на кресленнях не повинно перевищувати  $\pm 10\%$ . Кількість вимірювань в кожній точці має бути не менше трьох.

При використанні анемометрів час вимірювання в кожній точці повинно бути не менше 10 с.



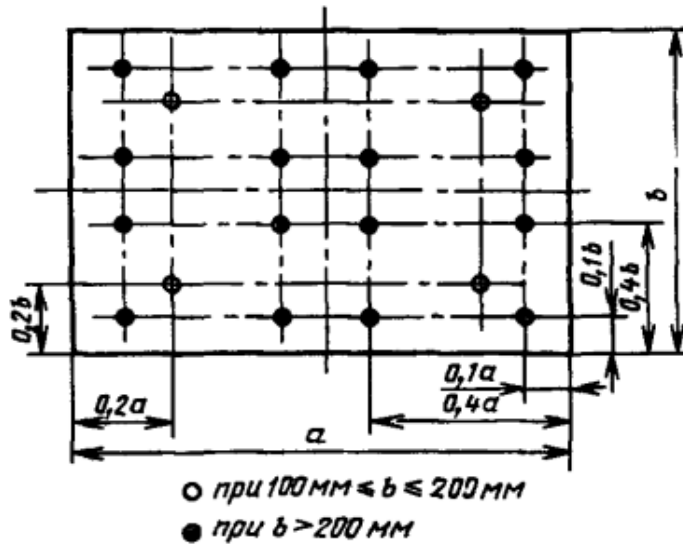


Рис. 5.1 Схема розташування точок вимірювання динамічного напору газу:

а - у газоході круглого перетину, б - у газоході прямокутного перетину

Конструкції приладів, що застосовуються для вимірювання швидкостей і тисків запилених потоків, повинні бути конструктивно пристосованими для проведення зручної їх очистки від пилу в процесі експлуатації.

Для проведення аеродинамічних випробувань у пожеже чи вибухонебезпечних виробництвах повинні застосовуватися прилади, з відповідною категорією і групою виробничих приміщень.

Випробування слід проводити не раніше ніж через 15 хв. після пуску вентиляційного агрегату.

При випробуваннях, в залежності від програми, вимірюють:

- барометричний тиск навколишнього повітряного середовища, Па;
- температуру переміщуваного повітря за сухим і вологим термометром, відповідно,  $t_i$  і  $f$ , °С;
- температуру повітря в робочій зоні приміщення  $t_{п}$ , °С;
- динамічний тиск потоку повітря в точці мірного перетину  $P_d$ , Па;
- статичний тиск повітря в точці мірного перетину  $P_{st}$ , Па;
- повний тиск повітря в точці мірного перетину  $P$ , Па.

При вимірюванні тисків і швидкостей потоку в повітропроводах при розташуванні мірного перетину на прямолінійній ділянці довжиною не менше  $8D_h$  допускається проводити вимірювання статичного тиску потоку повітря в окремих точках перетину комбінованим приймачем тиску.

Зазори між вимірювальними приладами і отворами, через які вони вводяться в закриті канали, повинні бути ущільнені під час випробувань, а після проведення випробувань – закриті.

Вимоги до вимірювальної апаратури при аеродинамічних випробуваннях аеродинамічних каналів наступні:

- а) комбінований приймач тиску - для вимірювання динамічних тисків потоку при швидкостях руху повітря більше 5 м/с і статичних тисків в усталених потоках;
- б) приймач повного тиску - для вимірювання повних тисків потоку при швидкостях руху повітря більше 5 м/с;
- в) диференціальні манометри класу точності від 0,5 до 1,0 - для реєстрації перепадів тисків;
- г) анемометри і термоанемометри – для вимірювання швидкостей повітря менш 5 м/с;
- д) барометри класу точності не нижче 1,0 - для вимірювання тиску навколишнього середовища;
- е) ртутні термометри класу точності не нижче 1,0 та термопари - для вимірювання температури повітря;
- ж) психрометри класу точності не нижче 1,0 і психрометричні термометри - для вимірювання вологості повітря [5-7].

### Послідовність виконання вимірювань та розрахунків

Послідовність проведення вимірювань наступна. На сталому режимі роботи вентилятора аеродинамічного стенду (поз. 1 рис. 1.5) проводиться послідовна фіксація повного та статичного напорів з двох досліджуваних ППТ:  $H_1$  та  $h_{st1}$ ,  $H_3$  та  $h_{st3}$  відповідно. Індекс «3» відповідає інтегруючим трубкам повного тиску, а індекс «1» – тарованій трубці Піто з врахуванням коефіцієнтів визначених у попередніх лабораторних роботах: коефіцієнт поля гідравлічної труби, тарувальний коефіцієнт мікроманометру та трубки Піто. Вимірювання кожного сигналу проводиться шляхом перемикання на вхід мікроманометру відповідних вимірювальних сигналів з датчиків багатоходовим клапаном (поз. 8 рис. 1.5). Таким чином, різниця  $(a - a_0)$  з врахуванням визначених коефіцієнтів фактично становитиме значення динамічного напору  $\Delta h = H - h_{st}$  для кожного окремо взятого датчика.

Вимірювання перепадів слід виконувати у всьому максимально можливому робочому діапазоні швидкостей повітря.

Таким чином, на основі величин, виміряних відповідно до програми досліджень, визначають:

- відносну вологість переміщуваного повітря  $r$ , %;

- щільність переміщуваного повітря  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>;
- швидкість руху повітря  $V$ , м/с;
- витрату повітря  $G$ , м<sup>3</sup>/с.

Відносну вологість переміщуваного повітря визначають за показаннями сухого і вологого термометра у психрометричному гігрометрі у відповідності з паспортом приладу (див. Дод. В). Для правильності показань вологого термометру приладу потрібно забезпечити процес аспірації за умов взаємодії гігрометра з повітрям при швидкості 0,5...1,0 м/с.

Густина повітря визначається залежністю, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_{нов} = \frac{P_{бар} + P_{st}}{R \cdot K_{\varphi} \cdot (t_{нов} + 273)}, \quad (5.2)$$

де:  $P_{бар}$  – барометричний тиск у лабораторії,  $P_{st}$  – статичний або повний тиск потоку, що вимірюється комбінованим приймачем тиску;  $K_{\varphi}$  - коефіцієнт, що залежить від температури і вологості повітря (табл. 5.1);  $R$  – питома газова стала для повітря, Дж/(кг·К), для повітря її значення становить  $R_{нов}=287$  Дж/(кг·К).

Таблиця 5.1 Залежність поправочного коефіцієнту від відносної вологості повітря.

t, °C	10		20		30		40		50	
$\varphi$ , %;	50	100	50	100	50	100	50	100	50	100
$K_{\varphi}$	0,998	1,003	1,000	1,005	1,004	1,012	1,01	1,025	1,02	1,04

Швидкість повітря у дослідній ділянці у загальному вигляді, м/с:

$$V_{нов} = \sqrt{2g \frac{\Delta h}{\rho_{нов}}}, \quad (5.3)$$

або з врахуванням показань лабораторного мікроманометру, м/с:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot g}{\rho} (a - a_0) \sin \varphi \cdot \gamma \cdot K \cdot \xi}. \quad (5.4)$$

У разі вимірювання барометричного тиску у мм рт. ст. можна скористатися спрощеною залежністю для визначення швидкості, м/с:

$$V = \sqrt{42,2 \frac{(273 + t^{\circ}C)}{P_a} (a - a_0) \sin \varphi \cdot \gamma \cdot K \cdot \xi}. \quad (5.5)$$

Формула (5.5) є робочою для визначення швидкості повітря при вимірюванні насадком та мікроманометром. Якщо величини  $\xi$  та  $K$  відомі для даного насадку та для його мікроманометра, тоді за допомогою цієї формули можна вирахувати  $V$  у м/сек.

Зазвичай швидкість повітряного потоку аеродинамічної труби необхідно знати у тому місці, де встановлюється досліджуваний об'єкт (у даному випадку – насадок повітряного тиску). Контрольний насадок аеродинамічної труби завжди встановлюється на деякій відстані (далі за потоком) від досліджуваного об'єкту. Внаслідок цього у формулу (5.4) та (5.5) необхідно ввести коефіцієнт поля труби  $\mu$  який має бути визначений заздалегідь (див. роботу №3). Тоді у загальному вигляді:

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho}(a - a_0) \sin \varphi \cdot \gamma \cdot K \cdot \xi \cdot \mu}. \quad (5.6)$$

Якщо приймати до розрахунку наявність водяної пари або вологості повітря, тоді у формулу (5.5) потрібно внести деякі уточнення. Уточнена формула для розрахунку швидкості матиме вигляд:

$$V = \sqrt{42,2 \frac{(273 + t^{\circ}\text{C})}{P_a} \frac{1}{1 - 0,378 \cdot r \cdot \frac{P_{\text{нп}}}{P_{\text{вол}}}} (a - a_0) \sin \varphi \cdot \gamma \cdot K \cdot \xi \cdot \mu}, \quad (5.7)$$

де  $P_{\text{вол}}$  – тиск вологого повітря при  $t^{\circ}\text{C}$  у мм рт. ст.;

$r$  – відносна вологість повітря, що визначається як відношення парціального тиску парів, що знаходиться у повітрі при температурі  $t^{\circ}\text{C}$  до тиску насичених парів у тому ж об'ємі за тієї ж температури;

$P_{\text{нп}}$  – тиск насичених парів при температурі  $t^{\circ}\text{C}$  у мм рт. ст.

Величина  $r \cdot \frac{P_{\text{нп}}}{P_{\text{вол}}}$  визначається за допомогою гігрометра та таблиці насиченої водяної пари (див. Додатки Б та В).

Витрата повітря становитиме,  $\text{м}^3/\text{с}$ :

$$G_{\text{нов}} = V \cdot S_{\text{мп}}.$$

$S_{\text{мп}}$  – площа каналу, (прямокутний канал 95x87 мм, 0,008265  $\text{м}^2$ ).

Перед вимірюваннями фіксується барометричний тиск. За результатами вимірювань заповнюється таблиця 5.2.

Таблиця 5.2

Параметр	Режим роботи вентилятору				
	I	II	III	IV	V
1. $H_1$ , мм	15	21	36	41	74
2. $h_{\text{st1}}$ , мм	3	5	7	9	17
3. $H_3 - h_{\text{st3}}$ , мм	11	24	41	50	85
4. $t$ , $^{\circ}\text{C}$	14	14,1	14,1	14,4	14,5

5. $r, \%$	48	48	49	49	46
6. $V_1, \text{м/с}$	6,48	7,49	10,08	10,59	14,13
7. $V_3, \text{м/с}$	5,94	8,77	11,46	12,66	16,51
8. $G_1^*, \text{м}^3/\text{с}$	0,049+0,01- 0,006	0,073+0,015- 0,009	0,095+0,019- 0,011	0,105+0,021- 0,013	0,137+0,027- 0,016
9. $G_3, \text{м}^3/\text{с}$					

\*– Послідовність розрахунку похибки наведена у Додатку Г [8].

### Необхідна апаратура та матеріали

- а) комбінований приймач тиску – трубка Піто;
- б) приймач статичного тиску – виводиться з робочої ділянки повітряного каналу;
- в) диференційний манометр типу ММН (К=1,0);
- г) барометр-анероїд типу БАММ-1 (К=1,0);
- е) датчик вимірювання температури у робочому каналі(К=1,0);
- ж) гігрометр психрометричний ВІТ-1.

### Робочі формули

$$\rho_{нов} = \frac{P_{бар} + P_{ст}}{R \cdot K_{\varphi} \cdot (t_{нов} + 273)},$$

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho} (a - a_0) \sin \varphi \cdot \gamma \cdot K \cdot \xi \cdot \mu}$$

$$V = \sqrt{42,2 \frac{(273 + t^{\circ}\text{C})}{P_a} \frac{1}{1 - 0,378 \cdot r \cdot \frac{P_{\text{нп}}}{P_{\text{вол}}}} (a - a_0) \sin \varphi \cdot \gamma \cdot K \cdot \xi \cdot \mu}$$

$$G_{нов} = V \cdot S_{\text{пр}}.$$

### Порядок проведення роботи

1. Ознайомитись зі схемою та характеристиками вимірювальної апаратури та послідовністю проведення вимірювань.
2. Перевірити адекватність показань температури та напорів датчиків ППТ.
3. Зрівняти показання барометра з даними Гідрометцентру України.
4. Забезпечити аерацію гігрометра психрометричного потоком вимірюваного повітря.
5. Провести дослід зі зміною швидкості повітря.

6. Опрацювати матеріали дослідів і визначити похибки вимірювань витрати повітря за Додатком Г.

### Контрольні питання

1. Які складові похибки вимірювання витрати необхідно врахувати? Які з них мають найбільший вплив на точність отриманих результатів?
2. У якій частині шкали приладу мають бути показання вимірюваних параметрів, на початку, у середині чи у кінці?
3. Яка мінімальна відстань має бути дотримана між місцем збурення потоку (коліно, зміна діаметру каналу і т.д.) та місцем встановлення ППТ?
4. Який вплив на результати вимірювання має вологість повітря? Чи обов'язково її враховувати?
5. Яка з наведених складових похибки вимірювання має найбільший вплив на точність результату вимірювання з далі перерахованих: похибка визначення гідравлічного діаметру, похибка визначення атмосферного тиску, похибка визначення перепадів тиску на ППТ, похибка визначення температури чи вологості повітря, або похибка визначення, що виникає від нерівномірності розподілу швидкості повітря у мірному перетині?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

### Визначення швидкості і витрати технологічних газів у газоходах

**Мета роботи** – ознайомлення з методикою вимірювання швидкості руху потоку повітря та його витрати та її застосування з крильчастими та термоанемометрами.

#### Теоретичні відомості та методика проведення вимірювань

Прилади для вимірювання швидкості повітря називаються анемометрами. За принципом дії анемометри бувають механічні і електричні. До механічних анемометрів відносяться крильчасті і чашкові. Крильчасті анемометри слугують для вимірювання малих швидкостей від 0,1 до 15 м/сек з похибкою  $\pm (0,1-0,3)$  м/сек. Чашкові анемометри дозволяють вимірювати більш високі швидкості від 0,5 до 50 м/с з похибкою  $\pm (0,2 - 0,4)$  м/с.

У запропонованій роботі використовується анемометр **Testo 410i** з крильчаткою діаметром 40 мм (рис. 6.1). Даний прилад відноситься до серії смарт зондів фірми Testo - професійних вимірювальних приладів, призначених для роботи зі смартфоном або планшетом на базі Android або Apple IOS. Для зручності роботи з анемометром на планшеті або смартфоні встановлюється додаток Testo Smart Probes [9].



Рис. 6.1. Крильчастий анемометр Testo 410

Дані з анемометра Testo 410i передаються на смартфон/планшет по Bluetooth на відстані до 15-20 м. За допомогою додатку можна переглянути виміряні дані на дисплеї мобільного пристрою, побудувати графіки, таблиці та надіслати результати вимірювань електронною поштою у форматах Excel або PDF.

У Додатку Testo Smart Probes є можливість задати параметри перерізу повітроводу для розрахунку об'ємної витрати та автоматичного розрахунку її середнього значення за часом або за кількістю вимірювань. До одного смартфона/планшета можна одночасно підключити шість і більше будь-яких смарт зондів Testo. Це можуть бути тільки крильчасті анемометри Testo 410i або їх комбінація з іншими бездисплейними смарт зондами цієї фірми-виробника.

Окрім швидкості та об'ємної витрати прилад дозволяє вимірювати температуру потоку повітря.

Основні характеристики анемометру приведені у табл. 6.1

Таблиця 6.1. Технічні характеристики анемометра Testo 410i

Габарити	154 x 43 x 21 мм
Діапазон вимірювань	0,4...20 м/с (індикація: 0,4 ... 30 м/с)
Похибка	$\pm(0,2 \text{ м/с} + 2 \% \text{ від вим. знач. в діапазоні } 0,4 \dots 20 \text{ м/с})$
Робоча температура	-20...+50 °C
Діаметр крильчатки	40 мм

Принцип роботи крильчастого анемометра заснований на використанні складової сили тиску повітряного потоку на крило лопатевого колеса, яке повернуто під кутом 45° до напрямку руху повітряного потоку. Таким чином, повітряний потік створює крутний момент

на валу крильчатки. Чим вища швидкість повітря, тим більша сила тиску і тим більша швидкість обертання колеса. Крильчастий анемометр не можна встановлювати у повітряний потік, що має швидкість вище за допустиму межу вимірювання приладу, так як це призведе до відриву лопатей під дією відцентрових сил.

Для перевірки анемометрів застосовують таку апаратуру:

- аеродинамічні труби з пневмометричними трубками з діапазоном вимірювань 0,2-1 і 1-30 м/с;
- чашковий мікроманометр з границею вимірювання 0-200 мм вод. ст., класу точності 0,5;
- термометр спиртовий метеорологічний, низькоградусний;
- контрольний барометр з діапазоном вимірювання 570-1070 гПа.

Термоанемометричний метод виміру швидкостей потоку заснований на використанні властивості металевго провідника електричного струму змінювати свій опір при зміні температури. Тому головною частиною термоанемометра є мініатюрний металевий перетворювач, що вводиться у потік та нагрівається електричним струмом. Відведення тепла від перетворювача у потік відбувається тим інтенсивніше, чим більша швидкість потоку в області перетворювача. Кількість теплоти, що переноситься від датчика залежить від наступних факторів: швидкості потоку; різниці температур перетворювача потоку; фізичних властивостей середовища; геометричних розмірів і фізичних властивостей перетворювача; положення перетворювача відносно вектора швидкості.

Для перевірки використано термоанемометр типу **Tenmars TM-4001**, технічні характеристики якого наведені у табл. 6.2.

Таблиця 6.2. Технічні дані термоанемометра **Tenmars TM-4001**

Одиниці виміру	Проміжок	Роздільність	Точність
м/с	0,01-40,00	0,01	± 3% читання
км/год	0,02-144,00	0,1	
милі/год	0,12-89,5	0,1	
вузли	0,11-77,75	0,01	± 1 FS
фути/хв	0-7874,0	0,1	
бофорт	1-12	1	-

Робоча температура та вологість приладу: -20...+ 50 °С, <80% RH. Прилад представлений на рис. 6.2, устрій термоанемометру та призначення всіх його складових елементів та можливі функції наведені у додатку Д.



Рис. 6.2. Термоанемометр Tenmars TM-4001:

### **Послідовність виконання вимірювань та розрахунків**

1. Вимірювання швидкості повітря крильчастим анемометром реалізується на осі каналу, відповідно по значенню швидкості вимірюється приладом об'ємна витрата.

2. Вимірювання термоанемометром завдяки компактності датчика потрібно зробити у декількох точках перетину повітряного каналу (рис. 6.3). Витрату визначити за середньою швидкістю.

3. Вимірювання швидкості у кожній окремій точці каналу слід виконувати не менше 10 секунд, при цьому фіксується максимальне та мінімальне значення і обраховується середня швидкість потоку. Слід провести повторні процедури на змінних швидкостях повітря.

4. Отримані результати за обома приладами порівнюються з показаннями ППТ за методикою приведеною у Лабораторній роботі №5 приведених вказівок. За результатами порівняння показань з врахуванням допустимих похибок заповнюються таблиці 6.3 та 6.4 і будується графік залежності похибки від швидкості повітря (рис. 6.3). Наводиться висновок стосовно придатності вимірювального обладнання до застосування.

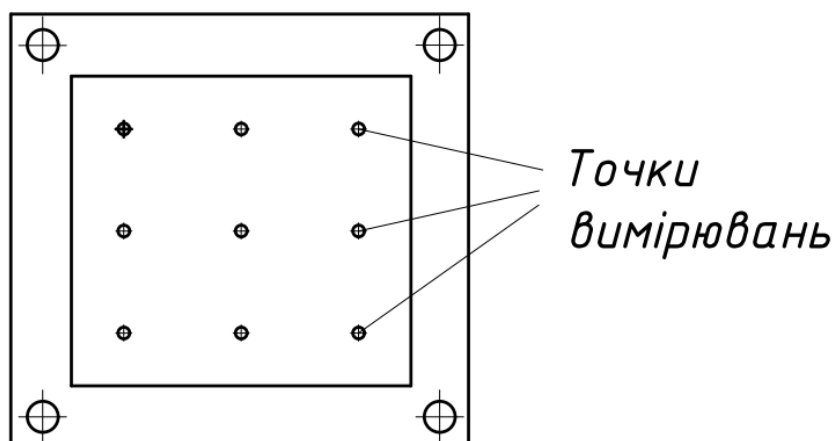


Рис. 6.3. Схема вимірювання поля швидкості у прямокутному каналі

Таблиця 6.3. Результати проведення випробувань

при  $F=...$ ,  $m^2$ ;  $T=...$ ,  $K$ ;  $\rho_{ж}=...$ ,  $kg/m^3$ ;  $a=...$ ,  $^\circ$ ;  $K=...$ 

№ п/п	Параметр,	Режим роботи вентилятору				
		I	II	III	IV	V
1.	$H_1$ , мм	15	21	36	41	74
2.	$h_{st1}$ , мм	3	5	7	9	17
3.	$t$ , $^\circ C$	14	14,1	14,1	14,4	14,5
4.	$r$ , %	48	48	49	49	46
5.	$V$ , м/с	6,48	7,49	10,08	10,59	14,13
6.	$G$ , $m^3/c$	0,049+0,01- 0,006	0,073+0,015- 0,009	0,095+0,019- 0,011	0,105+0,021- 0,013	0,137+0,027- 0,016
7.	$V_{ан}$ , м/с	7,4	9,2	12,3	13	16,5
8.	$G_{ан}$ , $M^3/c$	0,061161	0,076038	0,1016595	0,107445	0,1363725
9.	$V_{термоан}$ , м/с	6,9	8,3	10,7	11,6	15,4
10.	$G_{термоан}$ , $M^3/c$	0,0570285	0,0685995	0,0884355	0,095874	0,127281

Таблиця 6.4. Результати замірювання швидкості термоанемометром у контрольних точках

Контрольні точки	Швидкісний режим								
	I			II			II		
	min	max	mid	min	max	mid	min	max	mid
1									
2									
3									

4									
На осі									
Середні значення швидкості, м/с									

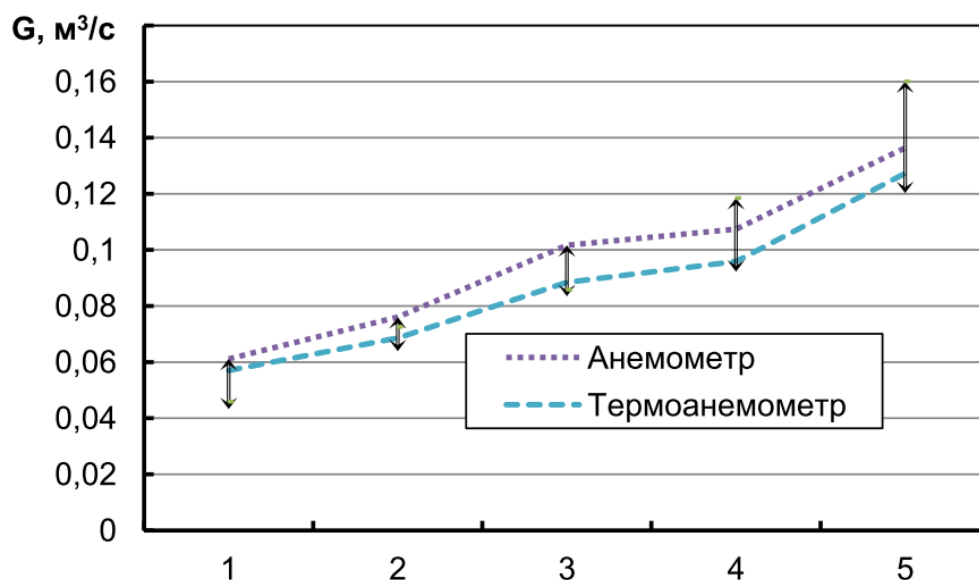


Рис. 6.3. Результати вимірювань витрати повітря з врахуванням допустимих похибок за ППТ

### Необхідна апаратура та матеріали

- а) комбінований приймач тиску – трубка Піто;
- б) приймач статичного тиску – виводиться з робочої ділянки повітряного каналу;
- в) диференційний манометр типу ММН (К=1,0);
- г) барометр-анероїд типу БАММ-1 (К=1,0);
- е) датчик вимірювання температури у робочому каналі(К=1,0);
- ж) гігрометр психрометричний ВИТ-1;
- з) анемометр крильчастий типу Testo 410i;
- и) термоанемометр Tenmars ТМ-4001.

### Робочі формули

$$\rho_{нов} = \frac{P_{бар} + P_{st}}{R \cdot K_{\varphi} \cdot (t_{нов} + 273)},$$

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho} (a - a_0) \sin \varphi \cdot \gamma \cdot K \cdot \xi \cdot \mu}$$

$$V = \sqrt{42,2 \frac{(273+t^{\circ}\text{C})}{P_a} \frac{1}{1-0,378 \cdot r \cdot \frac{P_{\text{мм}}}{P_{\text{вол}}}} (a-a_0) \sin \varphi \cdot \gamma \cdot K \cdot \xi \cdot \mu}$$

$$G_{\text{нов}} = V \cdot S_{\text{пр}}.$$

### Порядок проведення роботи

1. Ознайомитись зі схемою та характеристиками вимірювальної апаратури та послідовністю проведення вимірювань.
2. Встановити додаток до смартфона Testo Smart Probes та підключити прилад. Попередньо перевірити адекватність його показань.
3. Процедури вимірювання швидкості за допомогою ППТ та ММН слід виконати у відповідності з вказівками до Лабораторної роботи №5.
4. Провести вимірювання швидкості та витрати за допомогою анемометрів та ППТ. Зробити оформлення графічної частини та оформити висновки по роботі.

### Контрольні питання

1. Способи та прилади для вимірювання швидкостей повітря.
2. Пристрій анемометра.
3. В яких діапазонах швидкостей використовуються анемометри різних типів?
4. Особливості застосування термоанемометрів?

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. В.И. Трёмбовля, Е.Д. Фингер, Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. 1991, 416 с.
2. Горшенин Д.С., Мартынов А.К. Методы и задачи практической аэродинамики, М: Машиностроение, 1977, 240с.
3. Г.П. Дикий, О.Н. Костиков, Гидрогазодинамика: учебное пособие по лабораторному практикуму. Харьков, ХАИ, 1989, 78 с.
4. Инженерные методы расчёта погрешностей при выполнении лабораторных работ по курсам «Тепломассообмен» и «Техническая термодинамика» / сост. В.В. Босый, Г.Н. Васильченко, Е.Н. Панов. – К. : «КПІ», 1985. – 72 с.
5. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник. / П.П. Кремлевский–4-е изд. – Л. : Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1989. – 701 с.
6. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы / В.П. Преображенский. – М. : Энергия, 1978. – 704 с.
7. Е.А. Украинец, В.В. Василенко, И.В. Романенко, И.О. Коломиец, Экспресс-методика измерения местной скорости потока в аэродинамической трубе малых дозвуковых скоростей, Системи озброєння і військова техніка, 2014, №1(37).
8. ГОСТ 12.3.018-79
9. <https://www.testo.kiev.ua/ru/testo-410i.html>.

## ДОДАТОК А

## Приклад розрахунку датчиків повного напору (інтегруючих трубок)

Зазвичай відомий внутрішній діаметр трубопроводу –  $D_{\text{тр}}$ , а також його довжина  $z_{\text{тр}}$ <sup>x)</sup>.

Потрібно визначити: внутрішній діаметр інтегруючої трубки –  $d_{\text{тр}}$ ; діаметр отворів відбору –  $d_{\text{отв}}$ ; радіуси розташування їх на інтегруючій трубці –  $R_i$ ; кількість отворів -  $n$ .

На підставі [2]  $d_{\text{тр}}/D_{\text{тр}}=0,04-0,09$ . При цьому захарашення каналу - не більше 5%.

Визначаємо кількість отворів в інтегруючій трубці, що відповідає кількості рівновеликих площадок, в центрах яких вони розташовуються. Згідно [1], перетин трубопроводу розбивається на рівновеликі площадки: до  $\varnothing 150$  мм — 2-3 перетину,  $\varnothing 150$  мм -300 мм  $n= 3-5$ , от  $\varnothing 300$  мм і більше —  $n = 5$  і більше.

При площах перетину трубопроводів  $F_{\text{тр}}$  до  $0,35\text{м}^2$  кількість ділянок зростає до  $n=16$ , а при  $F_{\text{тр}}$  ще більше - число ділянок потрібно брати з таким розрахунком, щоб кожна ділянка мала площу не більше  $0,0232 \text{ м}^2$ . Потім розраховуються радіуси центрів рівновеликих площадок [1]:

$$R_i = R_{\text{тр}} \sqrt{\frac{2n-1}{2n}}.$$

Наприклад,

$$R_1 = R_{\text{тр}} \sqrt{\frac{1}{2n}},$$

$$R_3 = R_{\text{тр}} \sqrt{\frac{3}{2n}}.$$

$$R_5 = R_{\text{тр}} \sqrt{\frac{5}{2n}}$$

$$R_{2n-1} = R_{\text{тр}} \sqrt{\frac{2n-1}{2n}}$$

Для установки інтегруючої трубки потрібна відносна довжина труби (до і після неї)

$$\frac{z_{\text{тр}}}{D_{\text{тр}}} = 2 - 4,5 \text{ (похибка виміру витрати відповідно 6-3\%)}$$

Згідно [1], діаметри отворів на інтегруючій трубці  $d_{\text{отв}} = 0,3 d_{\text{тр}}$ , але не більше 2мм.

Витрата повітря, що вимірюється на вході в канал пальника:

$$V_n = 3600 \times 0,155 \times D_{\text{тр}}^2 \sqrt{\frac{\Delta P_g}{\rho}}, \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

де  $\rho = \frac{P}{RT}$ , кг/м<sup>3</sup> – щільність повітря при відповідних параметрах; P, Па – абсолютний тиск; R, Дж / кг К – газова стала; T – температура потоку в К;  $\Delta P_g = P_n - P_{\text{ст}}$ , Па – динамічний напір повітряного потоку; D<sub>тр</sub>, м – діаметр повітропровода.

У вихідній ділянці пального пристрою встановлюється водоохолоджувальна інтегруюча трубка, що дозволяє вимірювати як витрату продуктів згорання, так і їх склад (рис. А1).

В якості вторинних приладів для виміру витрат інтегруючими трубками в залежності від тиску можуть застосовуватися диференційні манометри або манометри інших типів. Ці ж прилади і використовуються для оцінки втрат тиску по трактах пального пристрою.

Склад продуктів згорання, що відбираються за допомогою водоохолоджувальної інтегруючої трубки, визначається хроматографами.

Витрата палива визначається за допомогою дросельних діафрагм. В якості вторинних приладів використовуються вказані манометри.

Для контрольної оцінки надійності роботи пального пристрою проводиться вимір температури металу. При цьому термопари приварюються до конусу і полум'яної труби пального пристрою, як правило, по одній утворюючій. Вторинними приладами для виміру температур є потенціометри.

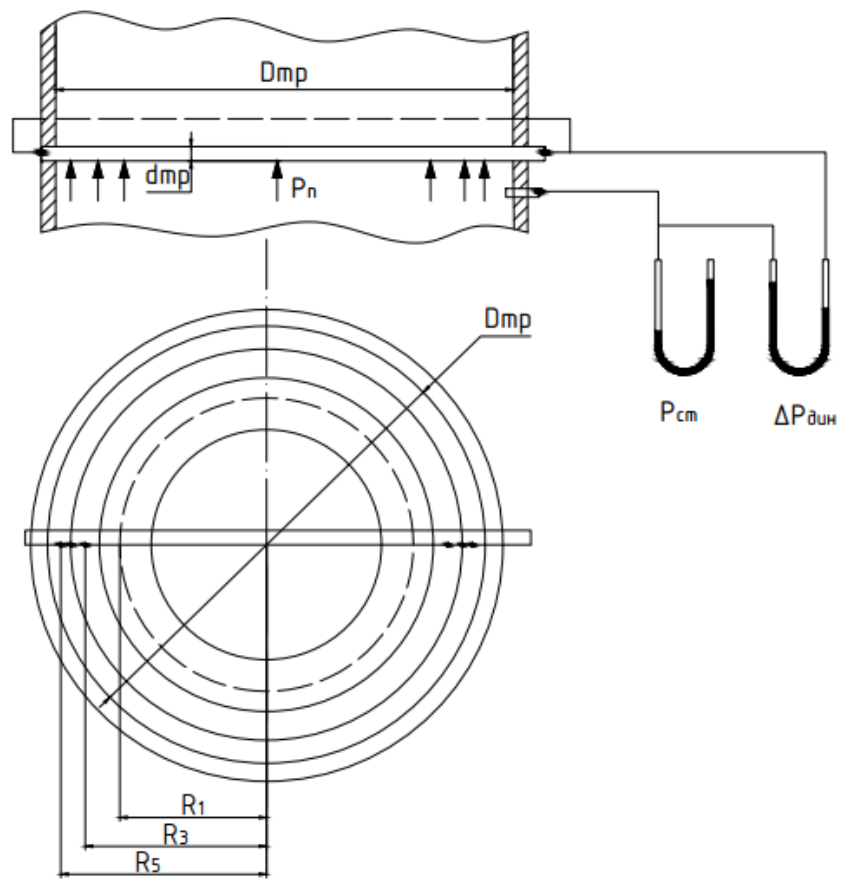


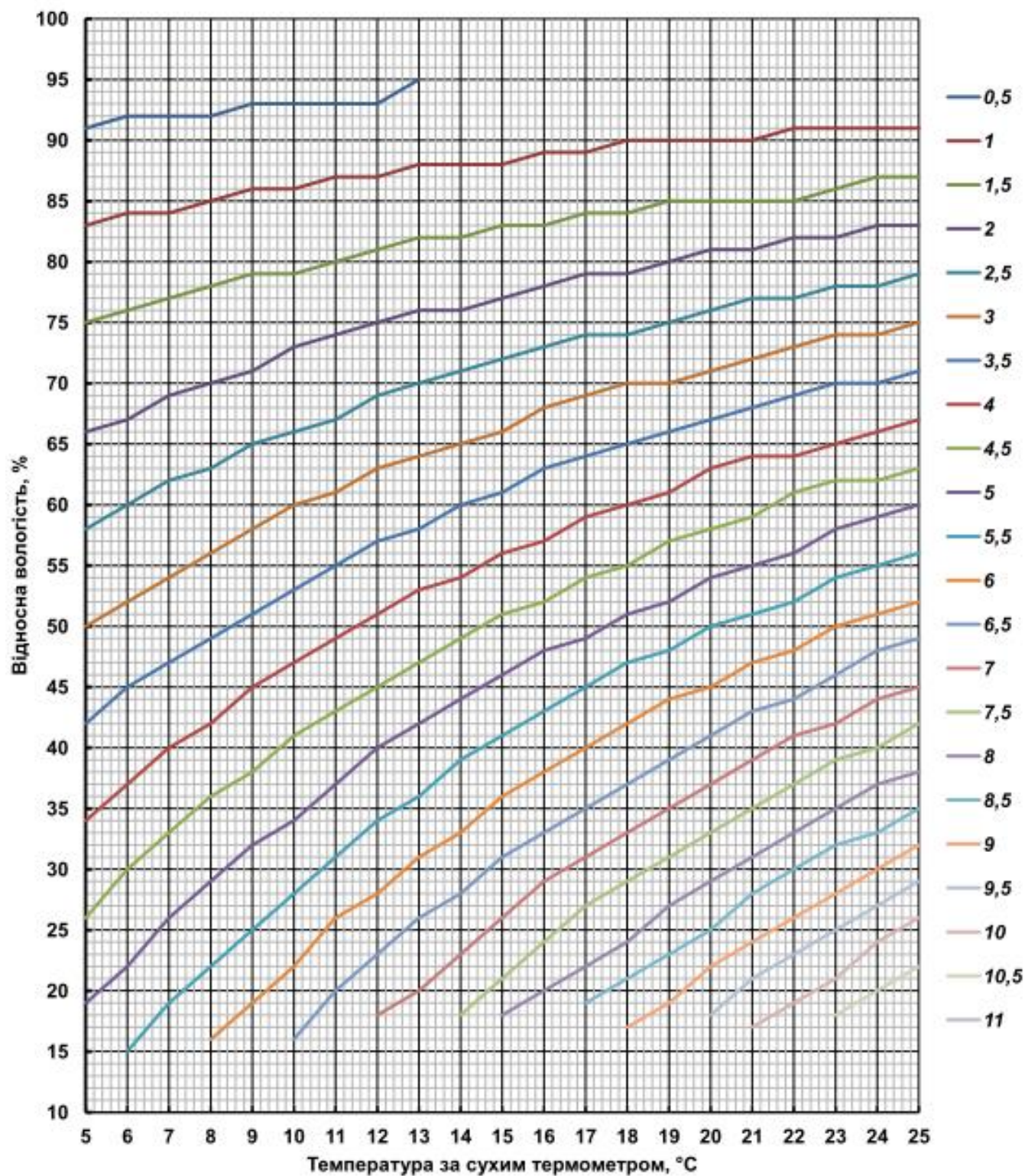
Рис. А.1 Принципова схема установки інтегруючої трубки виміру динамічного напору у каналі круглого перетину

**ДОДАТОК Б****Тиск та густина насиченої пари**

№	$T, K$	$p_{\text{нп}}, \text{Па}$	$\rho_{\text{нп}}, \text{кг/м}^3$
	263,15	287,842	0,002227
	273,15	610,481	0,00474
	283,15	1227,895	0,009359
	288,15	1705,188	0,01285
	303,15	4239,640	0,03041
	323,15	12372,282	0,0833

## ДОДАТОК В

## Номограма розрахунку відносної вологості повітря



## ДОДАТОК Г

## Оцінка похибки вимірювання витрати комплектом ППТ та чашкового дифманометру з похилою мірною трубкою

Гранична відносна похибка визначення витрати повітря у відсотках виражається наступною формулою:

$$\delta_G = (2\sigma_G + \delta_\mu),$$

де:  $\sigma_G$  – середньоквадратична відносна похибка, обумовлена неточністю вимірювань в процесі випробувань;

$\delta_\mu$  - гранична відносна похибка визначення витрати повітря, пов'язана з нерівномірністю розподілу, швидкостей у мірному перетині (величини дані в табл. В2 цього додатка).

Величину  $\sigma_G$  знаходять наступним чином:

$$\sigma_G = \left( 4\sigma_D^2 + \frac{1}{4}\sigma_B^2 + \frac{1}{4}\sigma_t^2 + \frac{1}{4}\sigma_p^2 \right)^{0,5},$$

де  $\sigma_D$  – середньоквадратична похибка визначення розмірів мірного перетину, що залежить від гідравлічного діаметра повітропроводу, приведена у табл. В1

Таблиця В1 Залежність похибки визначення гідравлічного діаметру від габаритів каналу

Розмір гідравлічного діаметру	Середньоквадратична похибка $\sigma_D, \%$
$50 \text{ мм} \leq D_H \leq 100 \text{ мм}$	4
$100 \text{ мм} < D_H \leq 300 \text{ мм}$	3
$D_H > 300 \text{ мм}$	2

Середньоквадратичні похибки вимірювання динамічного тиску  $\Delta P$  потоку, барометричного тиску  $P_{\text{бар}}$ , температури  $t$  потоку, відповідно  $\sigma_p$ ,  $\sigma_B$ ,  $\sigma_t$  в таблиці В3 цього додатка.

Користуючись табл. В2 та В3 і приведеними формулами, визначають граничну похибку визначення витрати повітря.

Таблиця В2. Гранична відносна похибка  $\delta_{\mu}$ , пов'язана з нерівномірністю розподілу швидкостей у мірному перетині

Форма перетину робочого каналу	Число точок вимірювань	$\delta$ , %, при відстані від місця збурення потоку до мірного перетину у гідравлічних діаметрах $D_H$				
		1	2	3	5	>5
Круг	4	20	16	12	6	3
	8	16	12	10	5	2
	12	12	8	6	3	2
Прямокутник	4	24	20	15	8	4
	16	12	8	6	3	2

Таблиця В3. Середньоквадратичні похибки  $\sigma_p$ ,  $\sigma_B$ ,  $\sigma_t$  показань приладів

Показання приладу у долях довжини шкали	$\sigma_p$ , $\sigma_B$ , $\sigma_t$ , %, для приладів класу точності	
	1,0	0,5
1,00	$\pm 0,5$	$\pm 0,25$
0,75	$\pm 0,7$	$\pm 0,24$
0,50	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$
0,25	$\pm 2,0$	$\pm 1,0$
0,10	$\pm 5,0$	$\pm 2,5$
0,05	$\pm 10,0$	$\pm 5,0$

**Приклад.** Мірний перетин розташований на відстані 3-х діаметрів за коліном повітропроводу діаметром 300 мм (тобто  $\sigma_D = \pm 3\%$ ). Вимірювання проводять комбінованим приймачем тиску у 8-ми точках мірного перетину (тобто за табл. В2 приймемо  $\delta_{\mu} = \pm 4\%$ ). Клас точності приладів (дифманометр, барометр, термометр) – 1,0. Відлік за усіма приладами виконується приблизно у середині шкали, тобто, за табл. В2  $\sigma_p$ ,  $\sigma_B$ ,  $\sigma_t = \pm 1,0\%$ . Гранична відносна похибка вимірювання витрати повітря складе:

$$\sigma_G = 2 \left( 4 \cdot 3^2 + \frac{1}{4} \cdot 1 + \frac{1}{4} \cdot 1 + \frac{1}{4} \cdot 1 \right)^{0,5} + 10 = \pm 12 + 10 = +22\%, -2\%$$

**Розрахунок.** Мірний перетин розташований на відстані більше 5-ти діаметрів від робочого колеса вентилятору діаметром мм (тобто  $\sigma_D = \pm 4\%$ ). Вимірювання проводять комбінованим приймачем тиску у 8-ми точках мірного перетину (тобто за табл. В2  $\delta_{\mu} = \pm 4\%$ ).

Клас точності приладів (дифманометр, барометр, термометр) – 1,0. Відлік за дифманометром в залежності від швидкісного режиму установки становить від 5 до 50% показань шкали, барометр – 75% , термометр – 50%, таким чином за табл. В2  $\sigma_p = \pm 10 \dots 1\%$ ,  $\sigma_B = \pm 0,7\%$ ,  $\sigma_t = \pm 1,0\%$ . Гранична відносна похибка вимірювання витрати повітря складе:

$$\sigma_G^{\max} = 2 \left( 4 \cdot 4^2 + \frac{1}{4} \cdot 10 + \frac{1}{4} \cdot 0,7 + \frac{1}{4} \cdot 1 \right)^{0,5} + 4 = \pm 16 + 4 = +20\%, -12\%$$

$$\sigma_G^{\min} = 2 \left( 4 \cdot 4^2 + \frac{1}{4} \cdot 1 + \frac{1}{4} \cdot 0,7 + \frac{1}{4} \cdot 1 \right)^{0,5} + 4 = \pm 16 + 4 = +20\%, -12\%$$

## ДОДАТОК Г

## Термоанемометр Tenmars TM-4001



1. Кнопка утримання; 2. Кнопка живлення струму; 3. Кнопка MAX/MIN; 4. Вліво/читання; 5. Кнопка режиму; 6. Дисплей; 7. Кнопка підсвічування; 8. Кнопка блоку; 9. Кнопка вгору; 10. Право/запис; 11. Кнопка вниз; 12. Кнопка входу; 13. Живлення постійного; 14. USB; 15. Зонд; 16. Тримач; 17. Власник акумулятора; 18. Кришка акумулятора; 19. Датчик гарячого дроту; 20. Датчик вологості; 21. Температурний датчик.