

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**ГРАДУЮВАННЯ ПНЕВМОМЕТРИЧНИХ
ПРИСТРОЇВ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ
ПОТОКУ ПОВІТРЯ
МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

О.А. Сірий

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за спеціальністю 144 Теплоенергетика

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Рецензент: *Баранюк О.В.*, канд. техн. наук, доц., КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний
редактор *Фуртат І.Е.*, канд. техн. наук, доц.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 6 від 24.06.2022 р.)
за поданням Вченої ради теплоенергетичного факультету
(протокол № 8 від 31.05.2022 р.)*

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

Реєстр. № НП 21/22-690 Обсяг 2,7 авт. арк.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
Проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<http://kpi.ua>

Свідотство про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© О.А. Сірий
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

ЗМІСТ

ВСТУП.	4
I. ФІЗИЧНІ ЗАСАДИ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ГАЗІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ПНЕВМОМЕТРИЧНИХ НАСАДКІВ.	5
1.1. Методика визначення швидкості потоку приймачем повітряного тиску.	5
1.2. Визначення швидкості потоку методом перепаду тисків.	10
II. МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКІВ.	13
2.1. Завдання №1 Тарування рідинних мікроманометрів.	13
2.2. Завдання №2 Повірка електронного дифманометру.	24
2.3. Завдання №3 Визначення коефіцієнта поля швидкісних напорів в робочій частині аеродинамічної труби.	26
2.4. Завдання №4. Тарування насадку приймача повітряного тиску.	32
2.5. Завдання №5 Визначення швидкості і витрати технологічних газів у газоходах.	37
2.6. Завдання №6. Визначення швидкості і витрати технологічних газів у газоходах.	46
Перелік посилань.	50
Додаток А. Таблиця А 1. Вихідні дані до розрахунку Завдання 1.	51
Додаток А. Таблиця А 2. Вихідні дані до розрахунку Завдання 2.	52
Додаток А. Таблиця А 3. Вихідні дані до розрахунку Завдання 3.	53
Додаток А. Таблиця А 4.1 Вихідні дані до розрахунку Завдання 4.1.	55
Додаток А. Таблиця А 4.2. Вихідні дані до розрахунку Завдання 4.2.	56
Додаток А. Таблиця А 5. Вихідні дані до розрахунку Завдання 5.	57
Додаток А. Таблиця А 6. Вихідні дані до розрахунку Завдання 6.	58
ДОДАТОК Б. Тиск та густина насиченої пари.	59
ДОДАТОК Г. Термоанемометр Tenmars TM-4001.	60

ВСТУП

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 практичні 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.

І. ФІЗИЧНІ ЗАСАДИ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ГАЗІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ПНЕВМОМЕТРИЧНИХ НАСАДКІВ

1.1. 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].

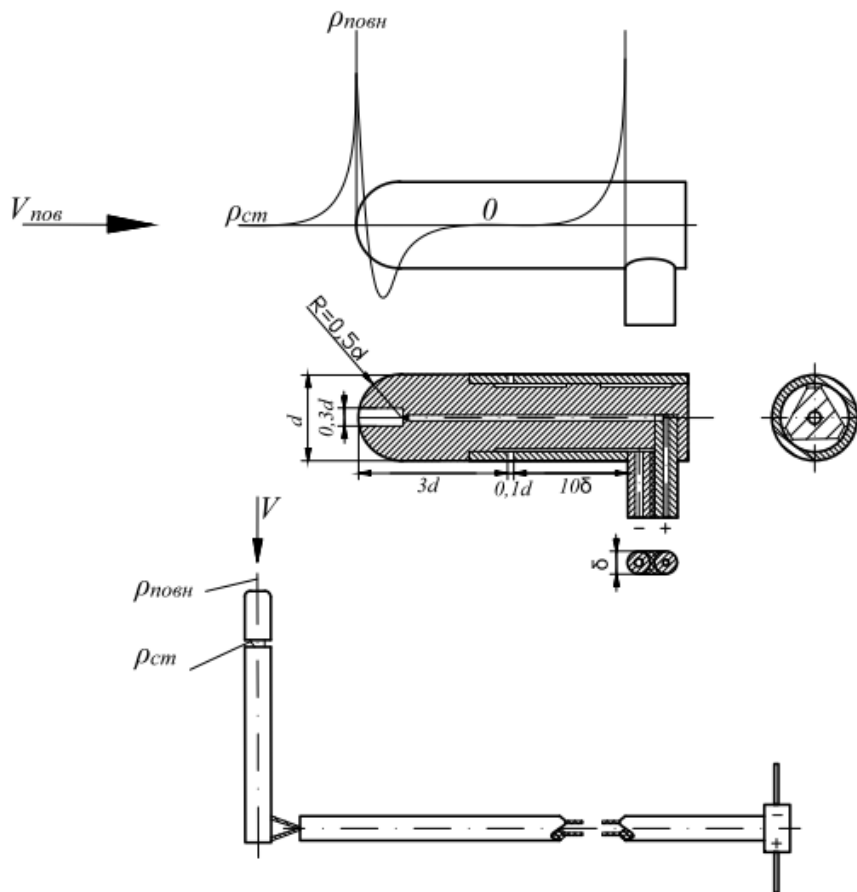


Рисунок 1.1 Схема приймача повітряного тиску ППТ

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 .

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 ρ – густина повітря на робочій частині аеродинамічної труби;

ε_p – коефіцієнт, що враховує вплив стисливості повітря, визначається за графіком (рис. 1.2) в залежності від числа M ; 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.

Густина повітря обчислюється за формулою:

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

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

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

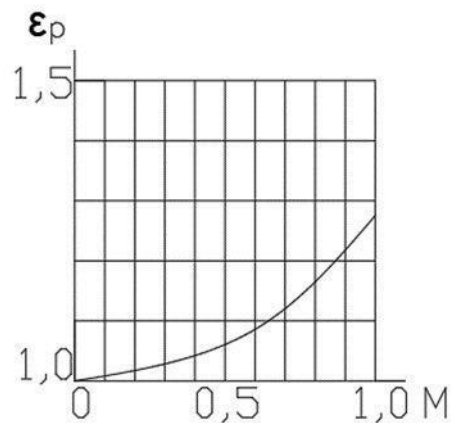


Рисунок 1.2. Графік залежності $\varepsilon_p = f(M)$, [2]

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 $p_{\text{повн}}$, який є тільки у критичній точці, а деякий середній тиск потоку, що має місце на поверхні фронтового 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 $p_{\text{повн}} - p_{\text{ст}}$, 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 точці¹.

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

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

За експериментальними даними ξ коливається в межах від 1,01 до 1,04 (для деяких варіантів розрахункової роботи цей діапазон може бути більшим).

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

$$p_{\text{повн}} - p_{\text{ст}} = (h - h_0)\gamma_p = \frac{\rho V^2}{2} \frac{\gamma_{\text{II}} V^2}{2g} \quad (1.9)$$

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

γ_p – вага одиниці об'єму рідини за нормальних умов.

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

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho}(h - h_0)\gamma_{\text{II}}\xi} \quad (1.10)$$

¹ Це значення прийнято лише для зручності розрахунку і зустрічається дуже рідко. При обчисленні швидкості за показаннями мікроманометра важливо знати дійсне значення γ [2].

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

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

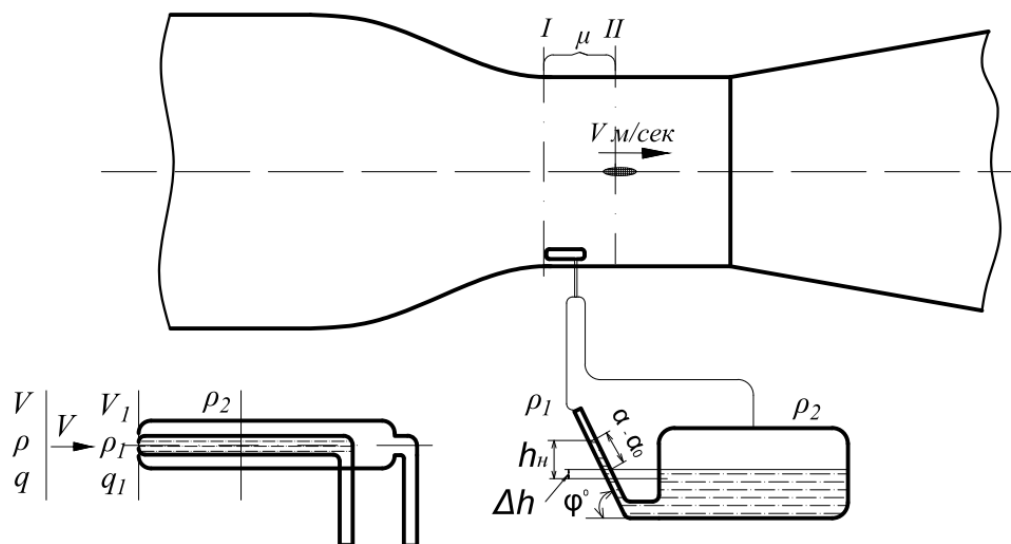


Рисунок 1.3 Схема визначення швидкості повітряного потоку в аеродинамічній трубці ППТ:

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

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:

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

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

кГ/дм³, 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 $Re = \frac{V d_{нас}}{\nu} \geq 700$, 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 площина 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).

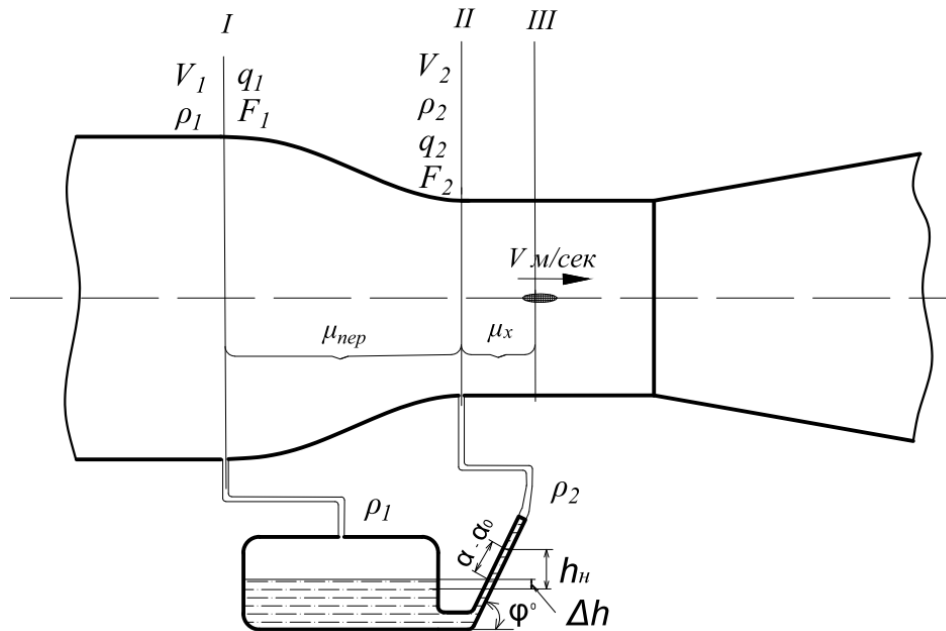


Рисунок 1.4. Схема визначення швидкості повітряного потоку в аеродинамічній трубці за перепадом тиску:

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

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 ζ – 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:

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

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

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

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 μ , що включає в себе коефіцієнт перепаду $\mu_{пер}$ і коефіцієнт втрат по довжині μ_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 μ 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 μ , коефіцієнта манометра K і коефіцієнта насадка ξ ?
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 ζ ?
6. Як впливає стисливість повітря на величину її швидкості?

II. МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКІВ

2.1. Завдання №1. Тарування рідинних мікроманометрів

Загальні відомості

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/см³, винятком є ртуть з питомою вагою 13,6 г/см³. 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. Сучасні газоаналізатори мають додатковий функціонал, що дозволяє визначати параметри тиску газів у робочих каналах та ємностях. Крім того, для технічних вимірювань застосовуються мембранні і сільфонні прилади.

При практичному застосуванні у лабораторних умовах для створення більш чіткого уявлення стосовно принципів і забезпечення точності результатів вимірювань тиску мікроманометром найбільш корисними є навички з тарування мікроманометра.

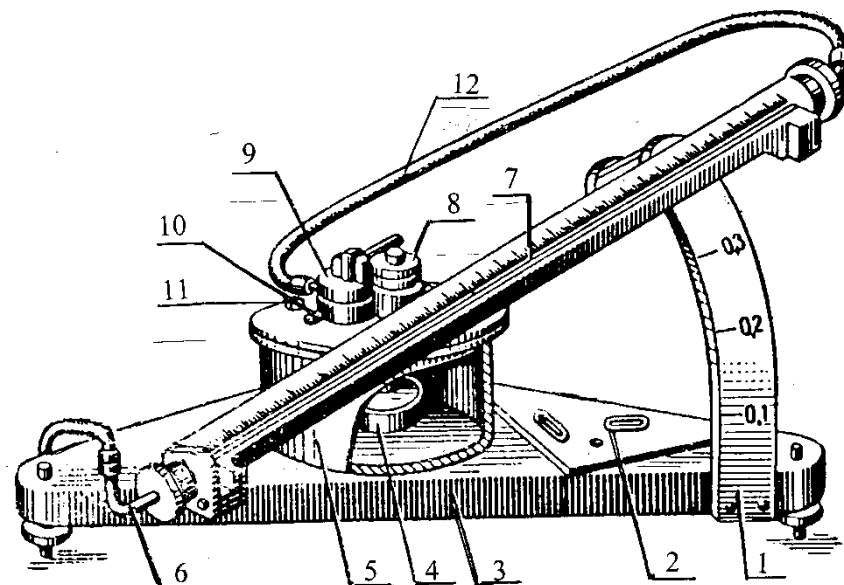
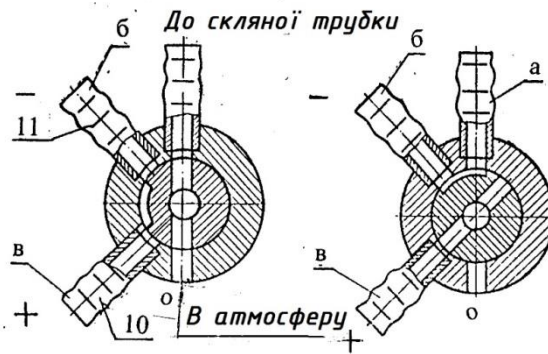


Рисунок 2.1. Мікроманометр ММН з нерухомим резервуаром і змінним нахилом трубки: 1 – скоба; 2 – рівні; 3 – станина; 4 – диск; 5 – циліндрична посудина; 6 – трубка; 7 – трубка скляна; 8 – гвинт; 9 – кран перемикання; 10,11 – ніпелі для підключення напоромірних датчиків; 12 – гумова трубка.

Мікроманометр складається з металевого корпусу 3, циліндричної нерухомої 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 нерухомою, 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.



а)

б)

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

Мікроманометр типу ММН має такі технічні характеристики:

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 (вакуумметрія), змінних тисків з дуже високими частотами коливань та інше [3].

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.

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 завданні ставиться задача визначення коефіцієнта K для обчислення різниці тисків за формулою (1.5). Величини a та a_0 відраховуються з мікроманометрів,

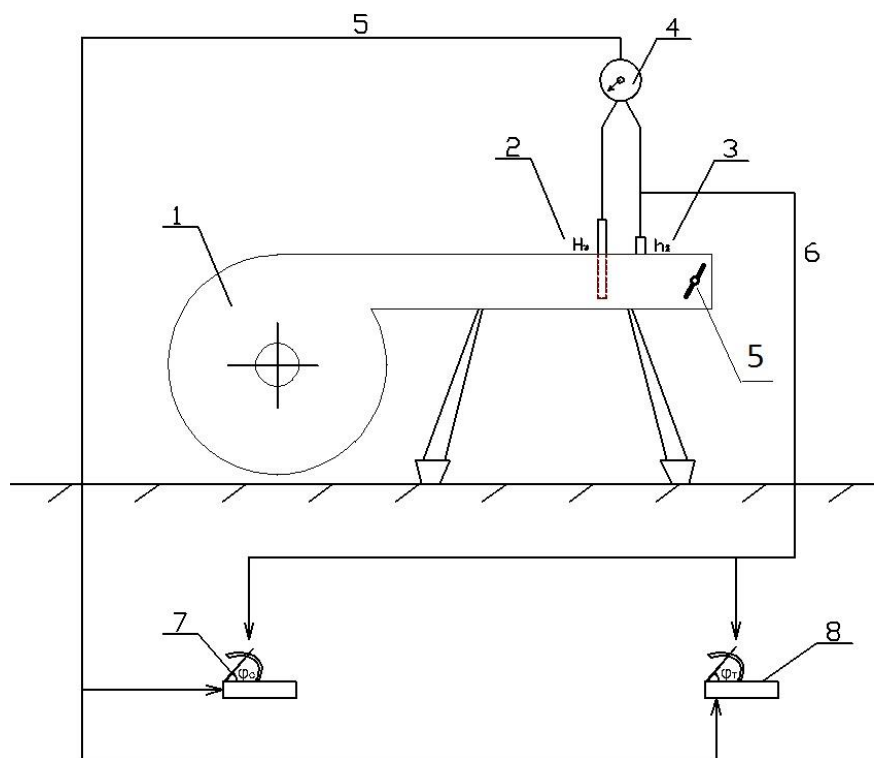


Рисунок 2.3 Тарування мікроманометра (схема вимірювань): 1 – відцентровий вентилятор; 2 – приймач повного тиску; 3 – приймач статичного тиску; 4 – багатоходовий клапан; 5 – шибер; 6 – сигнальні трубки; 7, 8 – мікроманометри зразковий та тарований

величини φ та γ 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 де кожен з них фіксує сигнал від імпульсних ліній, що відповідає однакої різниці тисків.

Послідовність виконання розрахунків

У робочих формулах, всі величини, що відносяться до еталону, мають індекс «e»; величини, що відносяться до мікроманометру, що тарується, – індекс «T». З схеми 2.3 видно яким чином забезпечується рівність вимірюваної різниці тисків, що подається від датчиків повного та статичного тисків. Динамічний тиск, що визначається різницею $p - p_{st}$ для обох мікроманометрів має бути однаковий, а різниця показань, якщо вона матиме місце, має бути врахована при обробці результатів дослідження.

Вважається, що температура рідини в обох мікроманометрах однакова.

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 декілька замірів, а потім провести процедуру виключення «промахів» та оцінку похибки експерименту. Для цього враховують результати вимірювання, що отримані 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:

$$tg \vartheta = \frac{(a - a_0)_e}{(a - a_0)_T} \quad (2.1)$$

Таким чином, коефіцієнт манометру, що тарується буде:

$$K_T = tg \vartheta \cdot const, \quad (2.2)$$

де:

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

будемо вважати:

$$const = K_e.$$

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).

Вихідні дані до розрахунку отримані з таблиці 2.1. Дані для проведення індивідуальних розрахунків по варіантах наведено у Додатку А.

Значення $tg \vartheta$ визначається **двома** шляхами: графічно та розрахунково. Графічним способом показаний на рисунку, де за допомогою функції лінійної апроксимації, що доступна у спеціалізованих редакторах для обробки результатів досліджень, визначають коефіцієнт a з рівняння прямої $y = ax + b$ (рис. 2.4) та підставляють у залежність (2.2), де коефіцієнт $K_e = 0,2$.

Таблиця 2.1 Таблиця вихідних даних до розрахунку

K=0,2		
	етал (a-a ₀), мм	тар (a-a ₀), мм
прямий хід	70	70
	34	15
	23	31
	25	35
	46	39
Зворотній хід	56	63
	113	107
	55	86
	115	125
	144	146

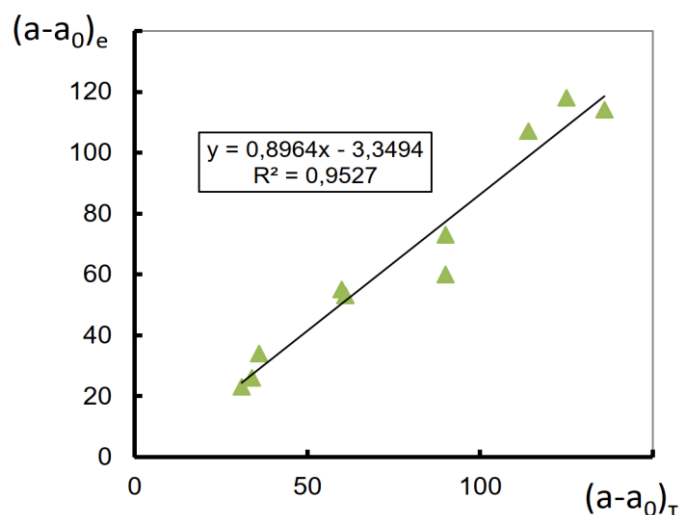


Рисунок 2.4. Графічне визначення коефіцієнта K_T манометра, що тарується

Результат визначення тарувального коефіцієнту K_T слід також виконати за нижче наведеною залежністю 2.3. Оскільки залежність між $(a - a_0)_e$ та $(a - a_0)_T$ має лінійний або близький до нього характер, то зручно скористатися таким виразом:

$$K_T = K_e \frac{\gamma_e \sin \phi_e \sum (a - a_0)^2}{\gamma_T \sin \phi_T \sum (a - a_0)_e (a - a_0)_T} \quad (2.3)$$

Вважатимемо, що мікроманометри мають однакову рідину і кут нахилу, тоді вираз 2.3 спроститься:

$$K_T = K_e \frac{\sum (a - a_0)^2}{\sum (a - a_0)_e (a - a_0)_T} \quad (2.4)$$

Отримані два значення порівнюються між собою, відхилення між ними має не перевищувати 5%. У разі невиконання умови слід провести процедуру визначення промахів, яка докладно представлена у наступному підрозділі цього посібника.

Виявлення промахів та оцінка похибки експерименту

Виявлення промахів та оцінку похибки експерименту пропонується виконати на основі розрахункового коефіцієнту η :

$$\eta = \frac{|(a - a_0)_e - (a - a_0)_m|}{(a - a_0)_e} \quad (2.5)$$

1. На першій стадії виділяються три виміри, у яких відхилення η_i від $\bar{\eta}_0$ - середнього найбільші. Для цього готується допоміжна таблиця, яка не наводиться у звіті (див. приклад для представленого варіанту).

Таблиця 2.2 Таблиця визначення максимальних відхилень вимірюваної величини

№	η	$\eta - \bar{\eta}_0$
1	0,307692	0,10701269
2	0,090909	0,109770527
3	0,5	0,299320383
4	0,059322	0,141357584
5	0,192982	0,007697161
6	0,065421	0,135259057
7	0,232877	0,032197095
8	0,150943	0,049736221
9	0,058824	0,141856088
10	0,347826	0,14714647
Σ	2,006796	
$\eta_0 = \Sigma/10$	0,20068	

Найбільше відхилення у 3-ої ($j=3$), 10-ої ($k=10$) та 9-ої ($z=9$) реалізацій які становлять ($\eta_j = 0,29932, \eta_k = 0,147146, \eta_z = 0,141856$). У рамках прийнятої гіпотези ці значення тимчасово виключаються з розгляду, як такі, що не належать до сукупності значень однорідної випадкової величини η .

2. Для статистичної перевірки висунутої гіпотези, попередньо, для решти (7-ми) значень досліджуваного параметра η , розраховуються: середнє $\bar{\eta}$, середньоквадратичне S, граничне Δ_{\max} та відхилення від $\bar{\eta}$ трьох параметрів η_j, η_k, η_z , які тимчасово виключаються.

$$\bar{\eta}_{i \neq j, i \neq k, i \neq z} = \frac{1}{7} \sum_{(i)} \eta_i = \frac{2,0068 - 0,5 - 0,347826 - 0,58824}{7} = 0,15716 \quad (2.6)$$

$$S|_{i \neq j, i \neq k, i \neq z} = \sqrt{\frac{\sum_{(i)} (\eta_i - \bar{\eta})^2}{7-1}} = 0,09318, \quad (2.7)$$

$$\Delta_{max} = S \times t_{5\%}(7) = 0,093178 \cdot 2,365 = 0,22037, \quad (2.8)$$

$$\Delta_j = |\bar{\eta} - \eta_j| = |0,15716 - 0,5| = 0,34284, \quad (2.9)$$

$$\Delta_k = |\bar{\eta} - \eta_k| = |0,15716 - 0,34783| = 0,190662, \quad (2.10)$$

$$\Delta_z = |\bar{\eta} - \eta_z| = |0,15716 - 0,05882| = 0,09834, \quad (2.11)$$

де $q=5\%$ – рівень значущості (вірогідність ризику) – перший параметр критерію Стьюдента, ($N=7$) – його другий параметр, дорівнює об'єму вибірки. Для вказаних q та N – параметрів, значення критерію становить $t_q(N) = 2,365$;

Рекомендується після необхідних обчислень підсумкові результати вказати у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 Зведення розрахованих значень для статистичної оцінки промахів експерименту

η_j	η_k	η_z	N	$t_q(N)$	$\bar{\eta}$	S	Δ_{max}	Δ_j	Δ_k	Δ_z
0,29932	0,14714	0,141856	7	2,365	0,15716	0,09318	0,220365	0,34284	0,19066	0,09834

Статистична перевірка висунутої гіпотези зводиться до порівняння розрахункових відхилень ($\Delta_j, \Delta_k, \Delta_z$) з граничним (Δ_{max}) і прийняття на цій основі відповідних рішень.

Зокрема, $\Delta_j > \Delta_{max}$ тому $\eta_j=0,29932$ з ймовірністю $(100-q)=95\%$, виключаються з подальшого розгляду як грубі промахи.

Значення Δ_k і $\Delta_z < \Delta_{max}$: тому $\Delta_k=0,14714$ і $\eta_z=0,141856$ з ризиком $q=5\%$, вважається таким, що належить сукупності значень однорідної випадкової величини η , тобто залишається у числі експериментальних даних.

Для решти ($N=7$) числа вимірювань розраховуються: середня, абсолютна (S) і відносна (K_v) похибки:

$$\bar{\eta}|_{i \neq j} = \frac{1}{9} \sum_{(i)} \eta_i = \frac{2,0068 - 0,5}{9} = 0,16742 \quad (2.12)$$

$$S|_{i \neq j} = \sqrt{\frac{\sum_{(i)} (\eta_i - \bar{\eta})^2}{9-1}} = 0,11021 \quad (2.13)$$

$$k_v = \frac{S}{\bar{\eta}} \times 100\% = 65,83\% \quad (2.14)$$

Після закінчення оцінювання похибок експерименту, у разі виявлення промахів будується уточнена залежність (див. рис. 2.9.).

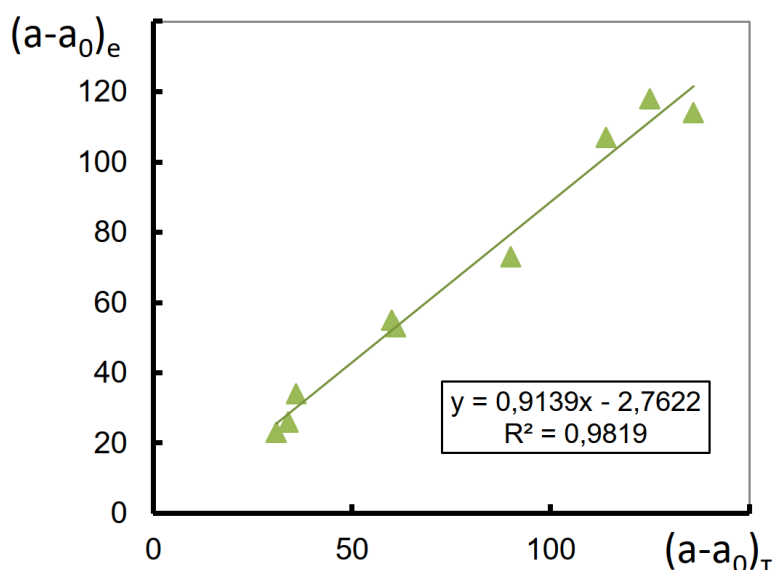


Рисунок 2.9. Графічне визначення коефіцієнта K_T манометра, що тарується

Зіставлення значень градуувального коефіцієнту K_T отриманого з уточненого рівняння та розрахованого за (1.4) має давати задовільне співпадіння, при цьому різниця коефіцієнтів не має перевищувати 5%.

$$\delta_v = \frac{|K_T^{розр} - K_T^{граф}|}{K_T^{розр}} \times 100\% = \frac{|0,1778 - 0,1828|}{0,1778} \times 100\% = 2,8\% \quad (2.15)$$

У разі більшої розбіжності значень слід детально перевірити процедуру виключення промахів та у разі необхідності провести подальшу процедуру виключення помилкових експериментальних точок.

Після завершення процедури виключення промахів у висновку фіксується розрахункове значення тарувального коефіцієнту, визначеного за формулою (2.4). Для розглянутого варіанту $K_T^{розр} = 0,1778$.

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.

2.2. Завдання №2. Повірка електронного дифманометру

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 ± 703 мм вод. ст. та роздільною здатністю 1 мм (рис. 2.10).



Рисунок 2.10 Дифманометр портативний цифровий AZ-82012

Діапазон вимірювання для обраних одиниць з роздільною здатністю приведено у табл. 2.4

Таблиця 2.4 Діапазон вимірювання

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

Основні технічні характеристики наведені у таблиці 2.5

Таблиця 2.5 Технічні характеристики досліджуваного дифманометру

Точність	$\pm 1,0$ % повного діапазону для 10-30 °C
Відгук	0,5 с
Компенсований	10 ~ 30 °C
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 2.11. приведена схема установки для проведення вимірювань.

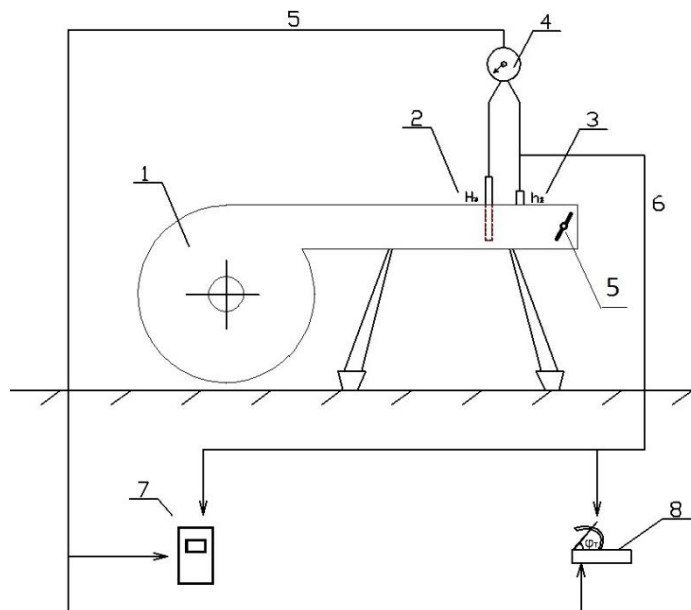


Рисунок 2.11 Повірка електронного мікроманометра (схема установки): 1– аеродинамічний стенд; 2–приймач повного тиску; 3–приймач статичного тиску; 4– багатоходовий клапан; 5–шибер; 6–сигнальні трубки; 7 – електронний дифманометр, 8 – зразковий мікроманометр

У даному завданні 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 розрахунків

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.

Перераховуємо показання манометра ММН у мм водяного стовпа:

$$\Delta H_{\text{рідинний}} = (a - a_0)_e \cdot K, \text{ мм.} \quad (2.16)$$

Відносна та абсолютні похибки рахуються за відомим співвідношеннями відповідно:

$$\Delta = \left| \Delta H_{\text{електр}} - \Delta H_{\text{рідинний}} \right|, \text{ мм} \quad (2.17)$$

$$\delta = \Delta_{\text{електр}} / \Delta H_{\text{рідинний}} \cdot 100, \% . \quad (2.18)$$

Нормована похибка враховує максимальне значення шкали повіряемого приладу (див. табл. 2.4):

$$\gamma = \Delta_{\text{електр}} / X_{\text{норм}} \cdot 100, \% . \quad (2.19)$$

Вихідні дані до розрахунку наведені у Додатку А (табл. А2).

Таблиця 2.6 Результати вимірювання тиску

№	$(a-a_0)_e$	К	$\Delta H_{\text{електр}}$	$\Delta, \text{мм}$	Відносна похибка $\delta, \%$	Нормована похибка $\gamma, \%$
1.	27	0,2	10	5	85	0,654
2.	28		10	4	79	0,626
3.	65		13	0	0	0,000
4.	89		24	6	35	0,882
5.	127		27	2	6	0,228
6.	142		31	3	9	0,370
7.	139		31	3	12	0,455
8.	122		18	6	26	0,910
9.	115		13	10	43	1,422
10.	98		25	5	28	0,768
11.	67		8	5	40	0,768

За результатами вимірів необхідно зробити порівняння максимально допустимого відхилення електронного приладу (за паспортом) з показаннями зразкового манометру та зробити відповідні висновки. У наведеному прикладі вимір № 9 має значення нормованої похибки $\gamma > 1,0\%$, тому потребує перевірки або заміни. У разі неможливості заміни, допустимо використовувати прилад у діапазоні, де метрологічні показники задовільняють паспортним даним.

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?

2.3. Завдання №3. Визначення коефіцієнта поля швидкісних напорів в робочій частині аеродинамічної труби

При вимірюванні швидкісного напору, тиску у потоці, а також відхилення потоку відносно повздовжньої вісі повітряного каналу (виміри проводяться вздовж обраної прямої у поперечному перетині повітряного каналу), 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:

$$\mu_{точ} = \frac{\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{точ}}{\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{сер}}, \quad (2.20)$$

де:

$$\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{сер} = q_{сер.пер} = \frac{\sum_1^n q_{пер}}{n}, \quad (2.21)$$

або

$$\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{сер.к.нас} = \frac{\sum_1^n q_{к.нас}}{n}. \quad (2.22)$$

Частіше величину μ 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:

$$\mu_{точ} = \frac{\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{точ}}{\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{к.нас}} \quad (2.23)$$

або

$$\mu_{точ} = \frac{\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{точ}}{\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{пер}}. \quad (2.24)$$

У наведених залежностях 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:

$$\mu = \mu_{\text{сеп}} = \frac{\sum_1^n \mu_{\text{точ}}}{n}. \quad (2.25)$$

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

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 uOz).

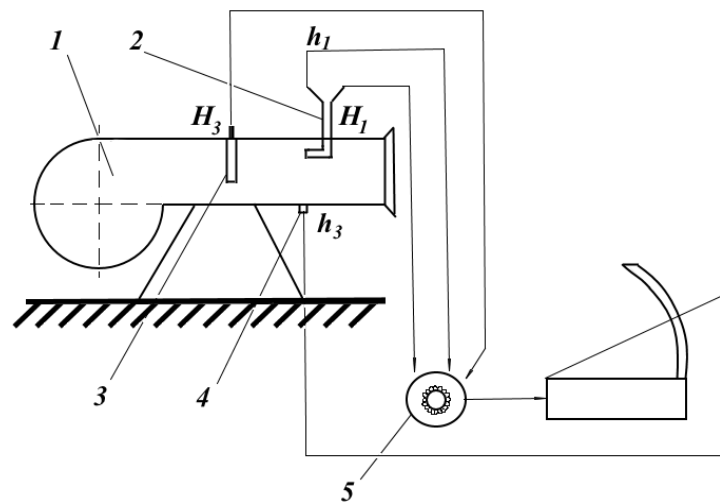


Рисунок 2.12. Схема комутації датчиків повітряного тиску з вторинним приладом): 1 – аеродинамічний стенд; 2 – ППТ на координатнику; 3 – приймач повного тиску (інтегруюча трубка); 4 – приймач статичного тиску; 5 – багатоходовий клапан

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 u в центральній частині труби крок 10 мм, ближче до стінок – 5 мм, 1-2 мм біля стінок, (рис. 2.12, 2.13). 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. 2.13.

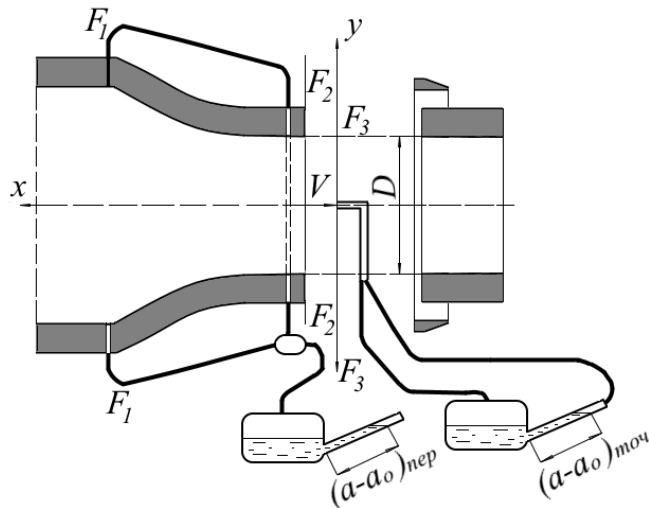


Рисунок 2.13. Визначення коефіцієнта поля швидкісних напорів в робочій частині аеродинамічної труби зі звуженням прохідного перетину каналу (схема установки)

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

$$\mu_{точ} = f(\bar{l}), \quad (2.26)$$

$$\bar{l} = \frac{l}{D_{тр}}, \quad (2.27)$$

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

$D_{тр}$ – діаметр труби для круглого перерізу робочої частини, або довжина сторони (у випадку прямокутного каналу).

При визначенні знаку величини l мається на увазі, що система координат – права. Діаграма (рис. 2.14) будується у довільному, але зручному для читання масштабі. Для робочого каналу висота становить 96 мм.

Таким чином, можна отримати коефіцієнт поля швидкісних напорів μ у перерізах F_1 , F_2 (див. рис. 2.13). У тому випадку, коли значення $\mu_{пер}$ невідоме, у формулу швидкісного напору $q_{пер}$ коефіцієнт $\mu_{пер}$ не вводиться. У результаті буде отриманий коефіцієнт поля швидкісних напорів μ у перерізі F_3 .

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

$$\mu = \mu_{сер} = \frac{1 + \sum_{i=1}^n \Delta\mu_{точ}}{n}, \quad (2.28)$$

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

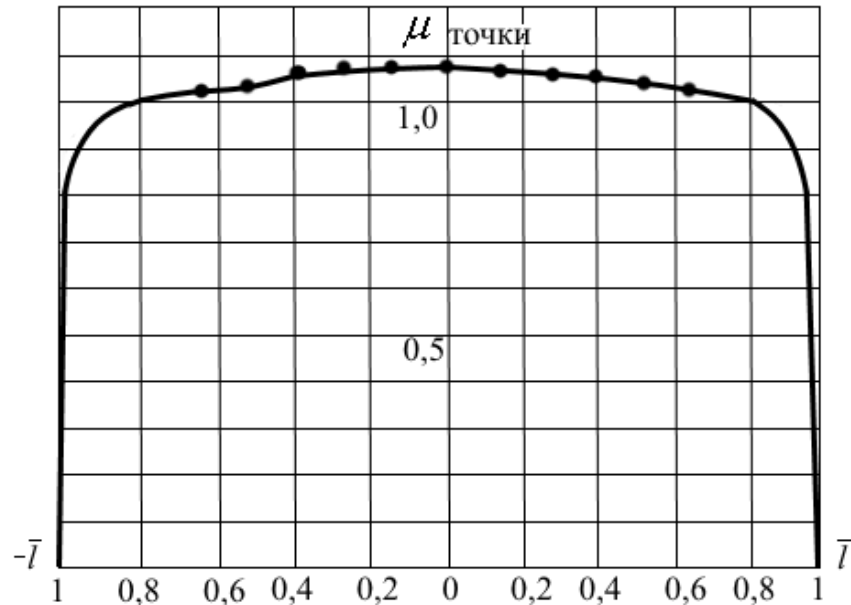


Рисунок 2.14. Графік значень коефіцієнта поля швидкісних напорів в заданому поперечному перерізі круглої труби

Останній спосіб дає більш точні результати визначення коефіцієнта поля труби.

Послідовність виконання розрахунків

Динамічний напір у точці динамічної труби $\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{точ}$ визначається різницею параметрів H та h_{st} для двох приймачів повітряного тиску: перший розміщений на координатнику, а другий – на стінці каналу. Дані отримані в обраному перетині дослідної ділянки при зміні орієнтації чутливого елемента за допомогою координатника. Кожне вимірювання проводиться за допомогою зразкового мікроманометра при перемиканні відповідних сигналів від ППТ гвинтом багатоходового клапану. Показання з мікроманометрів знімаються тільки після врівноваження рівня стовпа рідини.

Розрахунок динамічного напору проводиться за залежністю:

$$q = (a - a_0) \cdot K \cdot \xi \cdot \rho \cdot g \quad , \quad (2.29)$$

де $a - a_0$ – показання мікроманометра з похилою мірною трубкою, мм; K – коефіцієнт, що враховує густину рідини у мірній ємності (етиловий спирт) та \sin кута нахилу до горизонтальної поверхні; ξ – коефіцієнт насадку (приймаємо рівним 1,0); ρ – густина води, кг/м^3 , $g=9,81 \text{ м/с}^2$.

Визначення коефіцієнта поля швидкісних напорів у точці виконуємо за відношенням:

$$\mu_{moch} = \frac{q_{moch}}{q_{inm}} = \frac{\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{moch}}{\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)_{inm}}. \quad (2.30)$$

Якщо динамічний напір виражений у паскалях і його значення поділити на добуток $\rho \cdot g$, то можна його записати у міліметрах $h_d = \frac{V^2}{2g}$. Тоді динамічний напір у залежності 2.29 можна представити різницею повного та статичного тисків, що вимірюються ППТ:

$$q = (a - a_0) \cdot K = H - h_{st},$$

а саму залежність 2.30 представити виразом:

$$\mu_{moch} = \frac{(H - h_{st})_{moch}}{(H - h_{st})_{inm}}. \quad (2.31)$$

За методикою, що наведена у літературі [2], середнє значення коефіцієнта у разі значного відхилення значень від 1,0 слід визначати залежністю 2.28, але у подальших розрахунках μ_{moch} рекомендується застосовувати формулу 2.25.

Слід звернути увагу, що у залежності 2.25 важливо уточнити параметр n - кількість вимірних точок. Так, для усіх наведених варіантів $n = 7$ (у розрахунках не враховуються результати, що відповідають верхній ($x=0$ мм) та нижній ($x=96$ мм) стінкам каналу).

Результати розрахунків заносяться у таблицю 2.7. (Вихідні дані у Дод. А, табл. А3).

Таблиця 2.7

Параметр Положення по осі 0Z, мм	H	h_{st}	H	h_{st}	μ_{moch}	μ
	Робочий ППТ (в точці)		ППТ-інтегруюча трубка			
0	0	0	6	2	0,00	1,21
1	7	5	6	2	0,50	
5	57	4	31	2	1,83	
21	54	4	31	2	1,72	
41	45	4	31	1,5	1,39	
61	45	5	33	1,5	1,27	
81	35	5	32	2	1,00	
92	8	5	6	2	0,75	
96	0	0	7	1	0,00	

За результатами вимірювань будується діаграма поля швидкісних напорів рис. 2.15

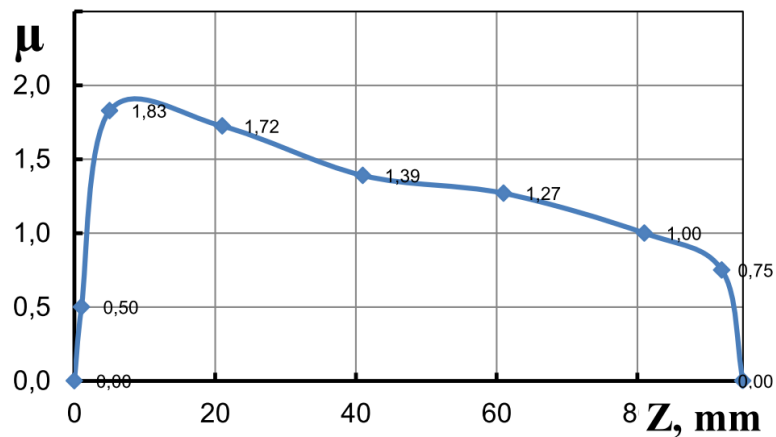


Рисунок 2.15. Діаграма поля швидкісних напорів для дослідного повітряного каналу

Отримане значення коефіцієнту використовується у подальших розрахункових залежностях при визначенні швидкості і витрати повітря. Слід зазначити, що при порівнянні графічного матеріалу отриманого експериментально з теоретичними даними, зокрема рис. 2.14 та 2.15, звертає увагу суттєва нерівномірність потоку повітря у дослідній ділянці та відмінність значень коефіцієнту від 1,0. Результати слід трактувати як експериментальні, а оскільки сама робоча ділянка являє собою фактично прямокутний повітряний канал встановлений на нагнітальному патрубку відцентрового нагнітача, тому відбувається зміщення максимуму коефіцієнта швидкісного напору до верхньої стінки каналу ($z \rightarrow 0$). Зазначені специфічні особливості відповідають швидкостям повітря у каналі 12-30 м/с, при менших значеннях швидкості, максимум профілю має менше виражену тенденцію до зміщення від центрального перетину до периферії каналу.

Контрольні питання

1. Чи може коефіцієнт поля труби μ 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?

2.4. Завдання №4. Тарування насадку приймача повітряного тиску

Коефіцієнт ППТ (насадка) ξ_T визначається дослідним шляхом, при безпосередньому порівнянні показань перепадів тиску дослідного приймача та зразкового, які мають бути зафіксовані в однаковому перерізі повітряного каналу (рис. 2.16).

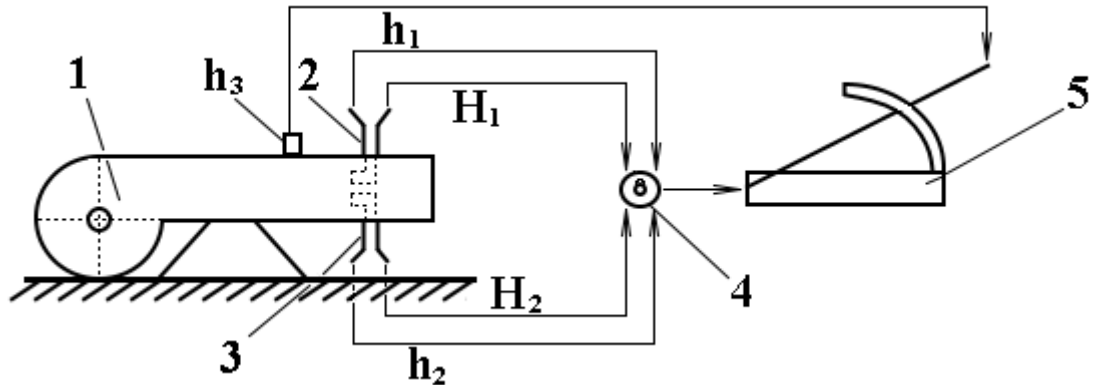


Рисунок 2.16. Тарування насадку (схема установки). 1 – аеродинамічний стенд, 2 – насадка, що тарується, 3 – зразкова трубка Піто, 4 – багатоходовий клапан, 5 – дифманометр

Для одного з насадків (еталонного) коефіцієнт ξ_e відомий заздалегідь, а для того що тарується, його потрібно визначити ξ_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 μ яка називається коефіцієнтом точки поля.

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

$$\xi_T = \frac{(a - a_0)_e \cdot \sin \varphi_e \cdot \gamma_e \cdot K_e \cdot \xi_e \cdot \mu}{(a - a_0)_T \cdot \sin \varphi_T \cdot \gamma_T \cdot K_T} = \operatorname{tg} \beta \operatorname{const}, \quad (2.32)$$

видно, що коефіцієнт тарованого насадку ξ_T являє собою добуток постійної величини const на тангенс кута β між віссю абсцис та прямою лінією. За умови використання одного мікроманометра з багатоходовим клапаном, вираз 2.32 спроститься:

$$\xi_T = \frac{(a - a_0)_e \cdot \xi_e \cdot \mu}{(a - a_0)_T} = \operatorname{tg} \beta \cdot \xi_e \cdot \mu. \quad (2.33)$$

Тоді, на експериментальній діаграмі через побудовані по координатам: $(a - a_0)_e$ – ординатою та $(a - a_0)_T$ – абсцисою отримаємо (рис. 2.17).

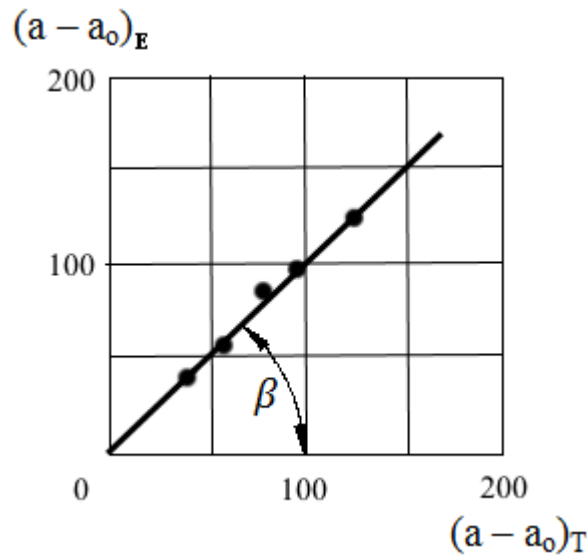


Рисунок 2.17. Графічне визначення коефіцієнта ξ_T насадку, що тарується

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 ξ_T тарованого насадку може бути використаний метод знаходження коефіцієнта манометра K_T за залежністю (за умови використання окремого мікроманометра до кожного ППТ):

$$\xi_T = \xi_e \frac{\gamma_e \cdot K_e \sin \varphi_e \cdot \sum (a - a_0)_e^2}{\gamma_T \cdot K_T \cdot \sin \varphi_T \cdot \sum (a - a_0)_e (a - a_0)_T}. \quad (2.34)$$

За умов тарування насадку за схемою на установці представленої на рис. 2.16, вираз 4.3 спроститься наступним чином:

$$\xi_T = \xi_e \frac{\sum (a - a_0)_e^2}{\sum (a - a_0)_e (a - a_0)_T}. \quad (2.35)$$

У даному випадку коефіцієнт μ 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.

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 ξ_T при куті повороту відомим на основі першої частини роботи. При цьому еталонний насадок має лишатись нерухомим. Щоб мати можливість вірно відрахувати кути α по лімбу, бажано початкове налаштування тарованого насадку провести за допомогою рівня чи кутоміра.

Таким чином, потрібно побудувати залежність динамічного напору від кута розміщення насадку по відношенню до осі аеродинамічної труби $\bar{q} = f(\varphi)$. Напір визначаємо за залежністю:

$$\bar{q} = \frac{(H_1 - h_{st1})_T}{(H_2 - h_{st2})_e} \cdot \frac{\xi_T}{\mu} \cdot 100\% \quad (2.36)$$

Приблизний вигляд такої кривої приведений на рис. 2.18, де значення \bar{q} подані у відсотках.

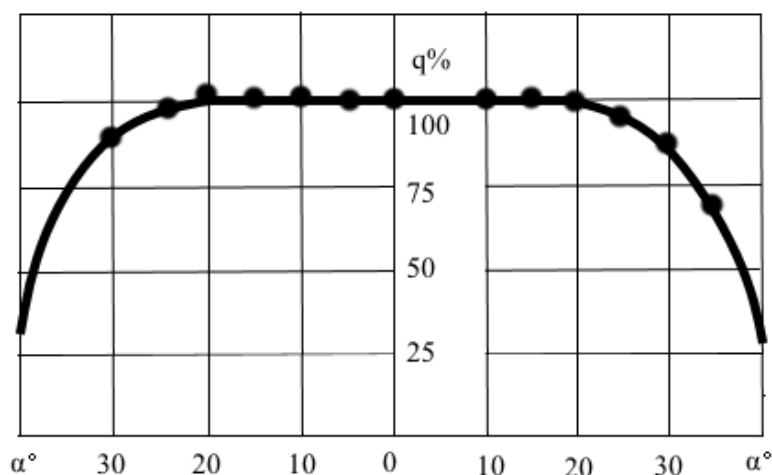


Рис. 2.18. Графік відліку при таруванні насадку під різними кутами відносно вісі каналу. Найчастіше насадки ППТ не чутливі до деякої не співвісності (до 20-25°), що і спостерігається на приведеному вище графіку.

Послідовність виконання розрахунків

Для *першої* частини роботи послідовність розрахунків буде такою. Оскільки коефіцієнт визначається за відношенням динамічних напорів на еталонному та тарованому насадках, тому з наведених у завданні даних (Дод. А, табл. А 4.1) потрібно порахувати динамічні напори h_d шляхом визначення різниці повного та статичного напорів H та h_{st} . За отриманими результатами будується залежність вигляду $h_{det} = f(h_{dtrap})$ (рис. 2.19). Також дані розрахунку заносяться до таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 Результати тарування ППТ

Режим	H_1	h_{st1}	h_{d1}	H_2	h_{st2}	h_{d2}
	ППТ, що тарується			Зразковий ППТ		
1.	19	5	14	19	3	16
2.	21	3	18	23	3	20
3.	31	6	25	32	5	27
4.	54	7	47	55	8	47
5.	85	11	74	83	13	70

Визначення коефіцієнту за залежністю 2.35 буде мати вигляд:

$$\xi_r = \xi_e \frac{\sum h_{d2_i}^2}{\sum h_{d2_i} \cdot h_{d1_i}} = 0,982.$$

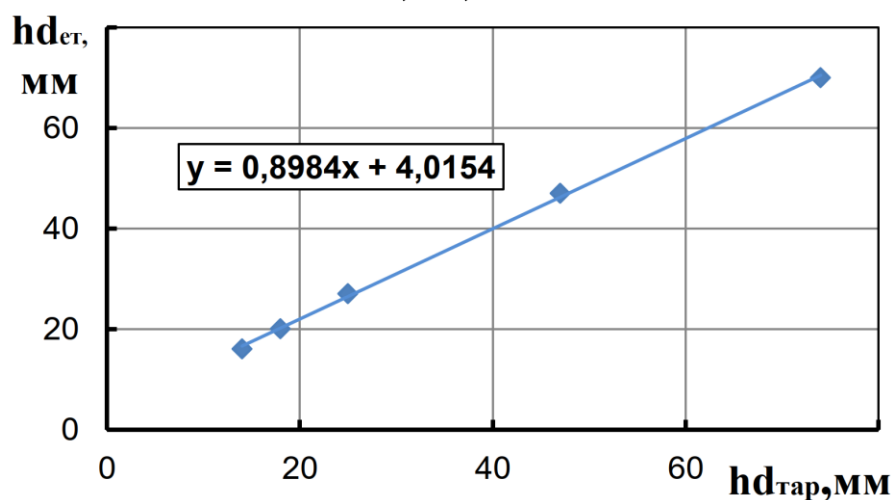


Рисунок 2.19 Графічне визначення коефіцієнту ξ_r

Графічно тарувальний коефіцієнт визначається з побудованого графіка і може бути прийнятий 0,9.

Слід звернути увагу, що для наступних розрахунків враховується значення отримане графічно.

У другій частині визначення впливу кута розміщення виконується при сталій швидкості потоку повітря. Аналогічно до попередньої частини роботи беруться до уваги статичні та повні напори з двох ППТ. За умови сталої роботи вентилятору, показання зразкового датчика (H_2 та h_{st2}) мають залишатися без змін, а напори з тарованого, при зміні кута φ мають змінюватись при збільшенні кута розміщення датчика по відношенню до осі каналу. Дані для розрахунків наводяться для кутів розташування у діапазоні $0^\circ \dots 35-45^\circ$ (Дод. А, табл. А 4.2). Обробка даних та побудова графічної залежності виконується після заповнення результатів у таблицю 2.9:

Таблиця 2.9 Визначення впливу кута розміщення на точність вимірювання динамічного напору ППТ

Кут φ , °	H_1	h_{st1}	H_2	h_{st2}	q
	ППТ, що тарується		Зразковий ППТ		
0	38,5	5	28	3	1,00
15	37	4	28	3	0,98
20	32	3	27	3	0,90
30	25	3	28	3	0,66
35	18	3	27	3	0,47
40	10	3	27	3	0,22
45	1	0	27	3	0,03

З врахуванням отриманих результатів у попередніх розрахунках (ξ_t та μ) будується графік як на рис. 2.20. за залежністю 2.36

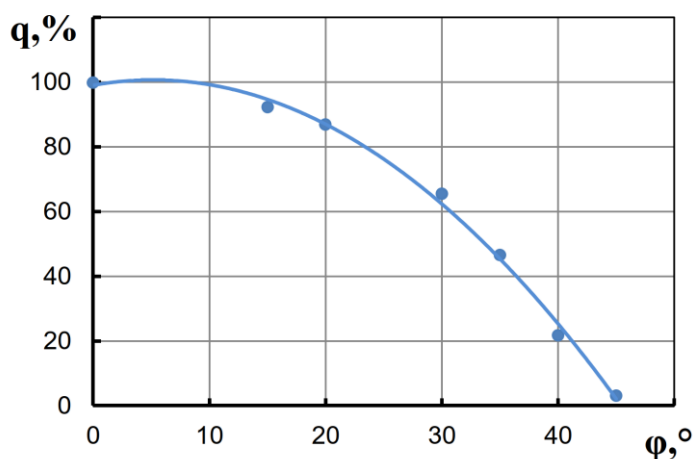


Рисунок 2.20 Вплив кута установки приймача на точність визначення динамічного напору

У висновках слід навести пораховані значення тарувального коефіцієнту та проаналізувати вплив кута установки на показання ППТ

Контрольні питання

1. Як теоретично можна уявити собі картину обтікання насадку (приймача тиску) при сферичній формі закруглення переднього кінця?
2. Як приєднується насадок до мікроманометру?
3. Який вплив форми насадку на чутливість насадку до кутів скосу потоку?

2.5. Завдання №5. Визначення швидкості і витрати технологічних газів у газоходах

У розрахунковій 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 μ , який представляє собою відношення середньої швидкості газу в газоході до швидкості на осі (див. розрахунки у завд. № 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:

$$D_h = \frac{4F}{P}, \quad (2.37)$$

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. 2.21 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.

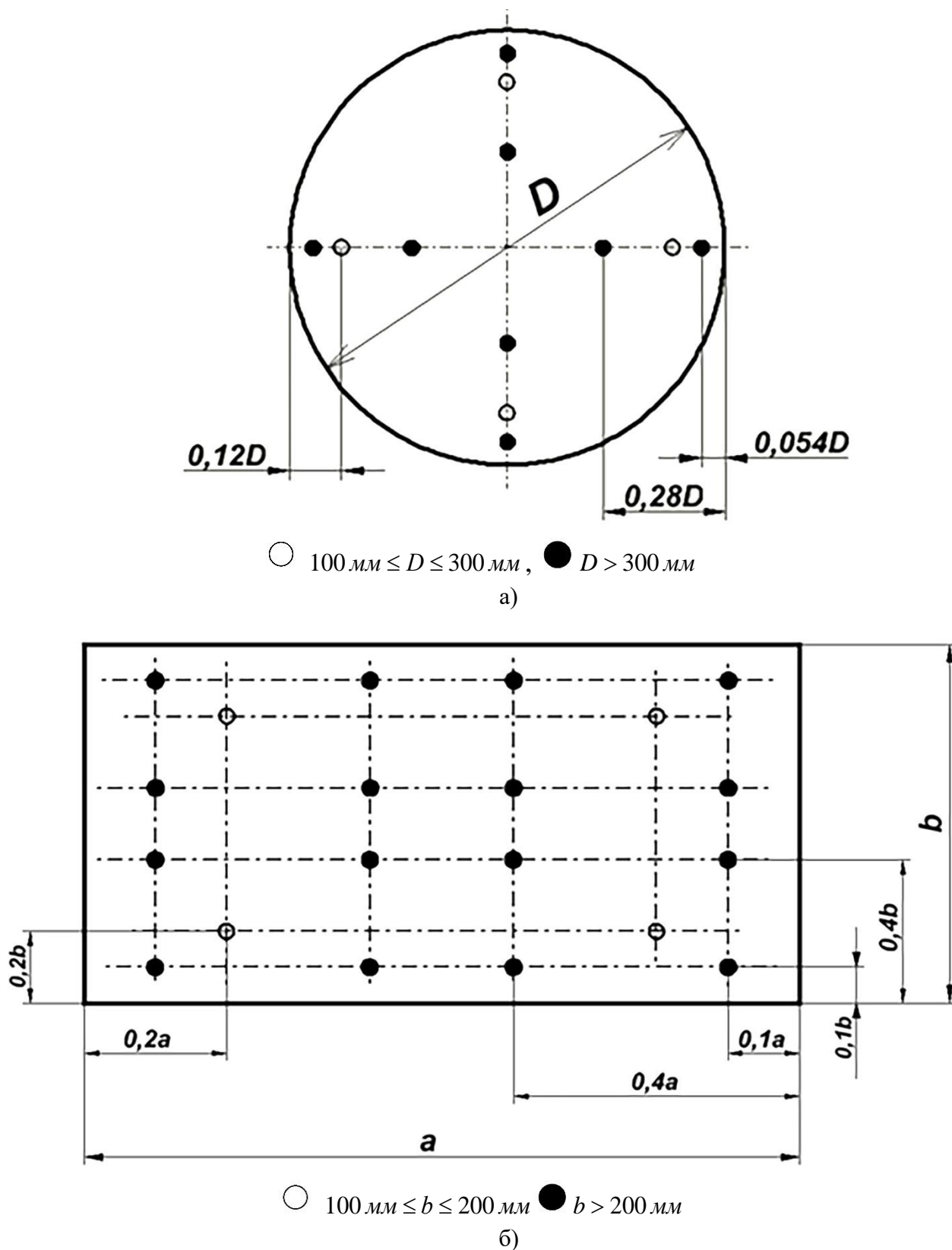


Рисунок 2.21 Схема розташування точок вимірювання динамічного напору газу у газоходах круглого (а) та прямокутного перетинів (б)

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_n , °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 $8D_n$ 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 розрахунків

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

- відносну вологість переміщуваного повітря r , %;
- густина переміщуваного повітря ρ , кг/м³;
- швидкість руху повітря V , м/с;
- витрату повітря G , м³/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/м³:

$$\rho_{нов} = \frac{P_{бар} + P_{st}}{R \cdot K_{\varphi} \cdot (t_{нов} + 273)}, \quad (2.38)$$

де: $P_{бар}$ – барометричний тиск у лабораторії, P_{st} – статичний або повний тиск потоку, що вимірюється комбінованим приймачем тиску; K_{φ} - коефіцієнт, що залежить від температури і вологості повітря (табл. 2.10); R – питома газова стала для повітря, Дж/(кг·К), для повітря її значення становить $R_{нов}=287$ Дж/(кг·К).

Таблиця 2.10 Залежність поправочного коефіцієнту від відносної вологості повітря.

t, °C	10		20		30		40		50	
φ , %;	50	100	50	100	50	100	50	100	50	100
K_{φ}	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:

$$V_{нов} = \sqrt{2g \frac{\Delta h}{\rho_{нов}}}, \quad (2.39)$$

або з врахуванням показань лабораторного мікроманометру, м/с:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot g}{\rho} (a - a_0) \sin \varphi \cdot \gamma \cdot K \cdot \xi}. \quad (2.40)$$

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

$$V = \sqrt{42,2 \frac{(273+t^{\circ}\text{C})}{P_a} (a-a_0) \sin \varphi \cdot \gamma \cdot K \cdot \xi} . \quad (2.41)$$

Формула (2.41) є робочою для визначення швидкості повітря при вимірюванні насадком та мікроманометром. Якщо величини ξ та K відомі для даного насадка 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 (2.40) та (2.41) необхідно ввести коефіцієнт поля труби μ який має бути визначений заздалегідь (див. роботу №3). Тоді у загальному вигляді:

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho} (a-a_0) \sin \varphi \cdot \gamma \cdot K \cdot \xi \cdot \mu} . \quad (2.42)$$

Якщо приймати до розрахунку наявність водяної пари або вологості повітря, тоді у формулу (2.41) потрібно ввести деякі уточнення. Уточнена формула для розрахунку швидкості матиме вигляд:

$$V = \sqrt{42,2 \frac{(273+t^{\circ}\text{C})}{P_a} \frac{1}{1-0,378 \cdot r \cdot \frac{P_{\text{нп}}}{P_{\text{вол}}}} (a-a_0) \sin \varphi \cdot \gamma \cdot K \cdot \xi \cdot \mu} , \quad (2.43)$$

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

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. Додаток Б).

Витрата повітря становитиме, м³/с:

$$G_{\text{нов}} = V \cdot S_{\text{мп}} . \quad (2.44)$$

$S_{\text{мп}}$ – площа каналу, (прямокутний канал 95x87 мм, 0,008265 м²).

Для заповнення таблиці 2.11 слід розрахувати K_{ϕ} , $\rho_{\text{пов.канал}}$, $p_{\text{нп}}$ та швидкості V_1 , V_2 , V_3 розраховані за різними формулами. Швидкість V_1 розраховується за формулою 2.39, де у якості Δh слід використати перепад на інтегруючій трубі $(H-h_{st})_{\text{інт.тр.}}$. V_2 рахується за формулою 2.41, а V_3 за формулою 2.43. В усіх залежностях коефіцієнт мікроманометру $K=0,2$ для усіх варіантів. Результати розрахунків швидкості мають бути близькими. Визначена витрата повітря обов'язково має враховувати допустиму похибку.

Таблиця 2.11

Параметр	Режим роботи вентилятору		
	I	II	III
1. $P_{\text{бар}}, \text{Па}$	99500	99500	99500
2. $(a-a_0), \text{мм}$	9	12	18
3. $h_{st}, \text{мм}$	1	2	3
4. $(H-h_{st})_{\text{інт.тр.}}, \text{мм}$	2	2,5	4
5. $t, ^\circ\text{C}$	22,1	22,2	22,3
6. $r, \%$	27	27	27
7. K_{ϕ}	0,9947	0,9947	0,9947
8. $\rho_{\text{пов.канал}}, \text{кг/м}^3$	1,1806	1,1803	1,1800
9. $P_{\text{н.п}}, \text{Па}$	2904,83	2921,72	2938,62
10. $V_1, \text{м/с}$	5,77	6,45	8,16
11. $V_2, \text{м/с}$	5,72	6,60	8,09
12. $V_3, \text{м/с}$	5,73	6,61	8,10
13. $G_1^*, \text{м}^3/\text{с}$	0,0473 (+0,009;- 0,006)	0,0547(+0,011;- 0,007)	0,067(+0,013;- 0,008)

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

$$\delta_G = (2\sigma_G + \delta_{\mu}), \quad (2.45)$$

де: σ_G – середньоквадратична відносна похибка, обумовлена неточністю вимірювань в процесі випробувань;

δ_{μ} - гранична відносна похибка визначення витрати повітря, пов'язана з нерівномірністю розподілу, швидкостей у мірному перетині (величини дані в табл. В2 цього додатка).

Величину σ_G знаходять наступним чином:

$$\sigma_G = \left(4\sigma_D^2 + \frac{1}{4}\sigma_B^2 + \frac{1}{4}\sigma_t^2 + \frac{1}{4}\sigma_p^2 \right)^{0,5}, \quad (2.46)$$

де σ_D – середньоквадратична похибка визначення розмірів мірного перетину, що залежить від гідравлічного діаметра повітропроводу, приведена у табл. 2.12.

Таблиця 2.12 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 ΔP потоку, барометричного тиску $P_{\text{бар}}$, температури t потоку, відповідно $\sigma_p, \sigma_B, \sigma_t$ в таблиці В3 цього додатка.

Користуючись табл. 2.13 та 2.14 і приведеними формулами, визначають граничну похибку визначення витрати повітря.

Таблиця 2.13. Гранична відносна похибка δ_μ , 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 2.14. 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	±0,5	±0,25
0,75	±0,7	±0,24
0,50	±1,0	±0,5
0,25	±2,0	±1,0
0,10	±5,0	±2,5
0,05	±10,0	±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:

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

Зауваження. 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 4-ох 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. В3 $\sigma_p = \pm 10 \dots 1\%$, $\sigma_B = \pm 0,7\%$, $\sigma_t = \pm 1,0\%$.

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?

ЗАВДАННЯ №6

Визначення швидкості і витрати технологічних газів у газоходах

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. 2.21). 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].



Рисунок 2.21. 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. 2.15

Таблиця 2.15. 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 °С
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 повірки 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 повірки використано термоанемометр типу **Tenmars TM-4001**, технічні характеристики якого наведені у табл. 2.16.

Таблиця 2.16. 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. 2.22, устрій термоанемометру та призначення всіх його складових елементів та можливі функції наведені у додатку Д.



Рисунок 2.22. Термоанемометр Tenmars TM-4001:

Послідовність виконання розрахунків

1. Об'ємна витрата повітря, що визначається з показань швидкості термоанемометру та крильчастого анемометру розраховується як середнє значення швидкості з діапазону наведених значень в окремих точках каналу, показаних на рис. 5,1 (б). Дані для розрахунку наведені в Додатку А, табл. А6.

2. Отримані результати за обома приладами порівнюються з показаннями ППТ за методикою приведеною у Завданні №5 приведених вказівок. Будуються графіки залежності витрати повітря для трьох розрахованих режимів роботи вентилятору з врахуванням допустимої похибки визначення витрати (рис. 2.23). Наводиться висновок стосовно придатності вимірювального обладнання до застосування.

Результати замірів швидкості у відповідних точках представлені у таблиці 2.17

Таблиця 2.17. Результати замірювання швидкості у контрольних точках

Контрольні точки	Швидкісний режим		
	I	II	III
Термоанемометр	5,61	7,06	8,38
Анемометр	5,68	7,38	8,9

Представлені у попередній таблиці значення швидкості ставляться у порівняння з результатами вимірювання швидкості за допомогою ППТ, додатково наводяться планки допустимих похибок розрахованих у відповідності з методикою представленою у попередньому завданні (рис. 2.23). У висновку зазначається можливість, або неможливість (у всьому діапазоні вимірювань, або його частині) застосування анемометру та термоанемометру.

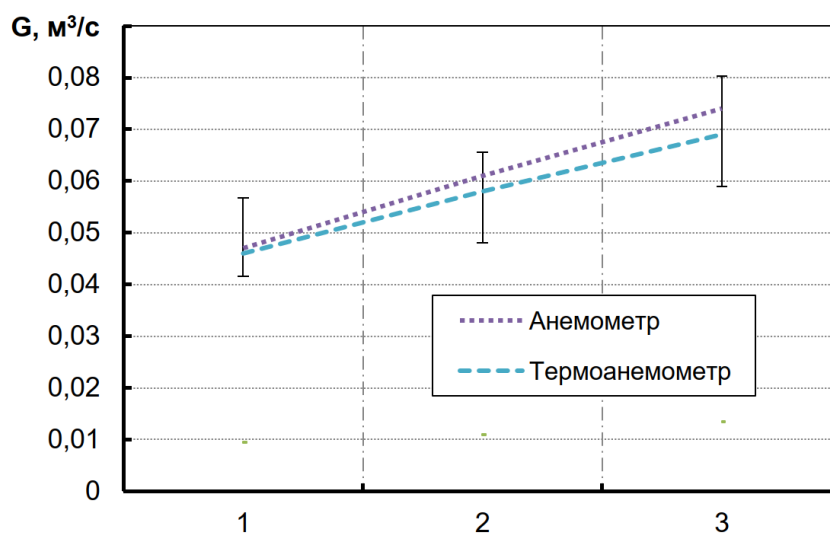


Рисунок 2.23. Результати вимірювань витрати повітря з врахуванням допустимих похибок за ППТ

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, Газодинамика: 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. : «КПП», 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

Таблиця А1. Вихідні дані до розрахунку Завдання 1

1 варіант		2 варіант		3 варіант		4 варіант		5 варіант		6 варіант		7 варіант		8 варіант		9 варіант		
K=0,2		0,2		0,2		0,2		0,2		0,2		0,2		0,2		0,2		
Виміряне значення, мм	стал (a-a ₀)	тар (a-a ₀)	стал (a-a ₀)	тар (a-a ₀)	стал (a-a ₀)	тар (a-a ₀)	стал (a-a ₀)	тар (a-a ₀)	стал (a-a ₀)	тар (a-a ₀)	стал (a-a ₀)	тар (a-a ₀)	стал (a-a ₀)	тар (a-a ₀)	стал (a-a ₀)	тар (a-a ₀)	стал (a-a ₀)	тар (a-a ₀)
прямий хід	17	9	16	8	19	10	16	8	99	28	201	78	102	29	220	75	26	30
	22	12	25	11	21	12	20	13	147	50	237	81	147	56	225	45	135	135
	34	22	39	23	35	19	29	22	185	65	263	93	190	66	306	84	25	31
	56	30	52	29	51	34	53	31	208	72	204	83	220	78	300	77	130	135
	73	38	83	36	70	35	74	33	220	76	194	61	237	81	180	57	128	133
зворотній хід	48	25	47	26	48	27	54	24	280	83	122	42	270	93	150	41	113	120
	37	19	35	20	33	19	41	21	220	76	94	29	204	83	83	25	79	86
	28	14	26	13	24	13	31	12	187	64	44	17	180	61	47	17	58	64
	24	12	25	11	22	12	21	13	133	45	31	12	122	42	35	12	33	36
	20	10	23	10	20	9	23	10	86	29	7	3	94	29	20	8	26	29
	10 варіант		11 варіант		12 варіант		13 варіант		14 варіант		15 варіант		16 варіант		17 варіант		18 варіант	
прямий хід	12	15	25	30	26	34	23	26	40	64	75	69	8	10	70	70	62	62
	115	119	100	115	55	60	110	118	33	36	40	36	53	71	34	15	34	35
	30	31	26	32	60	90	30	34	26	29	30	28	28	36	23	31	25	32
	110	122	111	124	118	125	140	149	32	31	35	29	25	37	25	35	28	33
	105	120	105	122	114	136	139	143	41	44	52	46	32	38	46	39	41	39
зворотній хід	111	120	119	136	107	114	70	120	68	70	80	73	35	39	56	63	77	62
	70	88	68	87	73	90	70	75	108	111	107	126	65	67	113	107	116	122
	66	69	53	71	53	61	57	62	83	85	102	95	85	98	55	86	86	91
	31	36	25	36	34	36	33	35	120	129	130	117	89	103	115	125	121	118
	29	33	27	30	23	31	10	32	90	140	140	134	119	148	144	146	115	152

Таблиця А2. Вихідні дані до розрахунку Завдання 2

1 варіант		2 варіант		3 варіант		4 варіант		5 варіант		6 варіант		7 варіант		8 варіант		9 варіант		
K=0,2		0,2		0,2		0,2		0,2		0,2		0,2		0,2		0,2		
Виміряне значення, мм	Еталон (a-a ₀)	Електр. диф. ман.	Еталон (a-a ₀)	Електр. диф. ман.	Еталон (a-a ₀)	Електр. диф. ман.	Еталон (a-a ₀)	Електр. диф. ман.	Еталон (a-a ₀)	Електр. диф. ман.	Еталон (a-a ₀)	Електр. диф. ман.	Еталон (a-a ₀)	Електр. диф. ман.	Еталон (a-a ₀)	Електр. диф. ман.	Еталон (a-a ₀)	Електр. диф. ман.
прямий хід	17	4	18	4	19	4	18	4	99	19	97	21	97	21	112	21	128	26
	22	4	19	4	23	4	22	4	147	30	141	33	141	33	158	33	113	25
	34	6,5	34	6	38	7	34	7	185	38	170	43	170	43	206	36	79	23
	56	11	63	12	59	10	51	11	208	42	213	40	213	40	238	39	58	15
	73	13	70	14	78	12	68	12	220	44	206	39	206	39	249	50	33	11
	48	9	41	8	49	9	51	10	280	49	272	52	272	52	275	49	26	6
	37	7	38	8	32	8	38	7	220	44	252	50	252	50	196	42	32	5
зворотній хід	28	5	29	5	28	5	30	5	187	37	178	42	178	42	169	39	41	6
	24	4	26	4	22	4	26	4	133	27	122	24	122	24	139	23	68	8
	20	4	22	3	22	3	17	3	86	17	75	18	75	18	80	16	108	13
	19	3,5	21	3	17,5	2,5	15	2,2	50	9	55	9	55	9	49	8	90	22
	12	3	17	3	13	2	9	2	35	6	35	6	35	6	30	6	129	18
	3	1	7	3	11	1	8	1	8	1	7	1	7	1	9	1	133	26
прямий хід	10 варіант		11 варіант		12 варіант		13 варіант		14 варіант		15 варіант		16 варіант		17 варіант		18 варіант	
	133	23	146	26	114	26	142	31	128	26	133	23	146	26	114	26	142	31
	97	23	92	26	104	25	127	27	113	25	97	23	92	26	104	25	127	27
	85	22	87	24	79	23	89	24	79	23	85	22	87	24	79	23	89	24
	51	15	56	14	58	14	65	13	58	15	51	15	56	14	58	14	65	13
зворотній хід	34	10	36	11	30	12	27	10	33	11	34	10	36	11	30	12	27	10
	23	7	25	6	26	7	28	6	26	6	23	7	25	6	26	7	28	6
	30	5	34	6	28	6	27	6	32	5	30	5	34	6	28	6	27	6
	38	6	37	7	36	7	40	6	41	6	38	6	37	7	36	7	40	6
	63	9	69	9	73	8	67	8	68	8	63	9	69	9	73	8	67	8
	91	12	97	12	111	14	115	13	108	13	91	12	97	12	111	14	115	13
	95	24	85	24	74	22	98	25	90	22	95	24	85	24	74	22	98	25
	118	18	108	16	120	16	122	18	129	18	118	18	108	16	120	16	122	18
137	27	148	28	151	29	139	31	133	26	137	27	148	28	151	29	139	31	

Таблиця А3. Вихідні дані до розрахунку Завдання 3

1 варіант					2 варіант					3 варіант					4 варіант					5 варіант					6 варіант				
Пара-метр	Робочий ППТ, мм		ППТ-інтегруюч а трубка, мм		Пара-метр	Робочий ППТ, мм		ППТ-інтегруюч а трубка, мм		Пара-метр	Робочий ППТ, мм		ППТ-інтегруюч а трубка, мм		Пара-метр	Робочий ППТ, мм		ППТ-інтегруюч а трубка, мм		Пара-метр	Робочий ППТ, мм		ППТ-інтегруюч а трубка, мм		Пара-метр	Робочий ППТ, мм		ППТ-інтегруюч а трубка, мм	
	z, мм	H	h _{st}	H		h _{st}	z, мм	H	h _{st}		H	h _{st}	z, мм	H		h _{st}	H	h _{st}	z, мм		H	h _{st}	H	h _{st}		z, мм	H	h _{st}	H
0	0	0	6	2	0	0	0	6	2	0	0	0	6	2	0	0	0	6	2	0	0	0	6	2	0	0	0	6	2
1	7	5	6	2	1	7	5	6	2	1	6	5	6	2	1	6	5	6	2	1	6	5	6	2	1	33	15	55	8
10	35	8	24	4	10	29	7	24	4	14	26	8	26	4	14	32	9	25	4	10	115	36	60	10	10	88	23	65	10
21	36	8	22	3	21	32	8	25	3	21	36	7	23	3	21	33	9	22	3	21	128	32	79	13	21	111	32	78	12
33	38	8	18	3	33	31	9	22	3	38	37	9	22	3	33	35	9	20	3	33	110	30	80	14	33	110	30	80	14
41	38	8	24	3	41	28	9	22	4	41	38	8	22	3	45	33	7	22	3	41	106	30	83	13	41	94	31	75	17
61	30	10	25	4	61	31	9	27	4	55	33	10	19	4	60	31	9	25	4	61	104	30	85	15	61	94	31	82	15
81	13	10	25	4	81	16	10	24	4	81	18	9	22	4	85	10	9	11	4	81	80	31	77	13	81	77	28	75	13
96	0	0	7	1	96	0	0	7	1	96	0	0	7	1	96	0	0	7	1	96	0	0	7	1	96	0	0	7	1
7 варіант					8 варіант					9 варіант					10 варіант					11 варіант					12 варіант				
0	0	0	6	2	0	0	0	6	2	0	0	0	6	2	0	0	0	6	2	0	0	0	6	2	0	0	0	6	2
1	45	15	45	8	1	35	15	45	8	1	35	15	45	8	5	12	5	12	8	5	12	5	12	8	5	15	5	8	2
10	85	23	60	10	10	60	23	60	10	10	14	4	8	2	10	16	5	8	2	10	16	3	8	2	10	19	2	12	2
21	125	32	84	12	21	90	32	84	12	21	16	4	11	2	21	17	3	11	2	21	17	3	9	2	21	17	2	10	2
33	110	30	80	14	33	95	30	80	14	33	16	4	12	2	33	18	3	13	2	33	18	4	9	2	33	18	2	10	2
41	100	31	75	12	50	97	31	75	12	50	18	4	12	2	50	17	4	11	2	50	20	4	10	2	50	15	1	9	2
65	94	31	82	15	65	94	31	77	16	65	16	5	12	2	65	25	5	13	2	65	18	5	8	2	65	18	5	8	2
90	50	34	35	13	88	55	34	35	13	88	55	34	35	13	88	33	5	15	2	88	33	5	15	2	88	33	5	15	2
96	0	0	7	1	96	0	0	7	1	96	0	0	7	1	96	0	0	7	1	96	0	0	7	1	96	0	0	7	1
13 варіант					14 варіант					15 варіант					16 варіант					17 варіант					18 варіант				
0	0	0	6	2	0	0	0	6	2	0	0	0	6	2	0	0	0	6	2	0	0	0	6	2	0	0	0	6	2
5	11	5	8	2	5	8	5	8	2	5	8	5	8	2	5	8	5	8	2	5	8	5	8	2	5	12	5	8	2

10	13	4	7	2	10	9	4	7	2	13	12	5	8	2	13	10	3	8	2	13	15	5	8	2	13	12	6	6	2
21	14	5	6	2	21	11	4	8	2	21	15	3	11	2	21	15	3	12	2	21	16	5	8	2	21	22	5	12	2
33	19	5	8	2	33	14	4	11	2	33	18	3	13	2	33	18	4	13	2	33	13	3	7	2	33	19	5	10	2
50	22	3	11	2	50	16	4	12	2	50	17	4	11	2	50	20	4	14	2	50	14	3	8	2	50	22	3	10	2
65	19	5	9	2	65	18	4	12	2	65	22	5	13	2	65	18	5	11	2	65	15	4	7	2	65	19	5	7	2
88	17	5	8	2	88	16	5	12	2	85	16	5	10	2	85	16	5	10	2	85	16	5	6	2	85	16	5	6	2
96	0	0	7	1	96	0	0	7	1	96	0	0	7	1	96	0	0	7	1	96	0	0	3	1	96	0	0	3	1

Таблиця А4.1 Вихідні дані до розрахунку Завдання 4.1

1 варіант					2 варіант					3 варіант					4 варіант					5 варіант					6 варіант				
Режим		ППТ що тарується, мм		Зразковий ППТ, мм	Режим		ППТ що тарується, мм		Зразковий ППТ, мм	Режим		ППТ що тарується, мм		Зразковий ППТ, мм	Режим		ППТ що тарується, мм		Зразковий ППТ, мм	Режим		ППТ що тарується, мм		Зразковий ППТ, мм	Режим		ППТ що тарується, мм		Зразковий ППТ, мм
№, з/П	H	h _{st}	H	h _{st}	№, з/П	H	h _{st}	H	h _{st}	№, з/П	H	h _{st}	H	h _{st}	№, з/П	H	h _{st}	H	h _{st}	№, з/П	H	h _{st}	H	h _{st}	№, з/П	H	h _{st}	H	h _{st}
1.	19	5	18	3	1.	22	2	19	3	1.	13	3	19	3	20	4	19	3	20	1.	21	1	19	3	1.	15	3	19	3
2.	21	3	22	3	2.	25	3	23	3	2.	13	0	23	3	25	3	23	3	25	2.	26	1	23	3	2.	15	0	23	3
3.	31	6	29	5	3.	35	5	32	5	3.	18	2	32	5	31	4	32	5	31	3.	33	3	32	5	3.	23	2	32	5
4.	44	7	46	8	4.	58	5	55	8	4.	34	6	55	8	57	6	55	8	57	4.	57	7	55	8	4.	38	5	55	8
5.	75	11	75	13	5.	83	10	83	13	5.	49	11	83	13	82	14	83	13	82	5.	85	10	83	13	5.	60	10	83	13
7 варіант					8 варіант					9 варіант					10 варіант					11 варіант					12 варіант				
1.	18	2	19	3	1.	19	2	19	3	1.	3	1	7	3	1.	10	3	15	3	1.	22	3	19	3	1.	10	3	19	3
2.	22	4	23	3	2.	23	3	23	3	2.	11	2	23	3	2.	25	1	27	3	2.	26	0	23	3	2.	17	4	23	3
3.	31	5	32	5	3.	35	5	32	5	3.	17	4	35	5	3.	38	7	40	5	3.	42	4	41	5	3.	22	5	32	5
4.	60	6	60	8	4.	55	6	55	8	4.	28	7	50	8	4.	55	10	55	8	4.	58	6	55	8	4.	38	8	55	8
5.	77	10	83	13	5.	83	11	83	13	5.	50	12	83	13	5.	83	12	83	13	5.	86	13	83	13	5.	49	11	70	13
13 варіант					14 варіант					15 варіант					16 варіант					17 варіант					18 варіант				
1.	8	4	19	3	1.	17	3	19	3	1.	22	3	19	3	1.	10	3	19	3	1.	10	4	19	3	1.	10	3	19	3
2.	14	4	23	3	2.	21	1	23	3	2.	26	2	23	3	2.	17	4	23	3	2.	14	4	23	3	2.	18	4	23	3
3.	22	5	40	5	3.	33	7	32	5	3.	33	4	32	5	3.	22	5	32	5	3.	22	5	35	5	3.	22	5	35	5
4.	37	8	63	8	4.	55	10	55	8	4.	58	6	55	8	4.	38	8	55	8	4.	37	8	60	8	4.	37	8	45	8
5.	55	15	83	13	5.	83	12	83	13	5.	86	13	83	13	5.	55	11	83	13	5.	50	15	80	13	5.	50	15	66	13

Таблиця А4.2 Вихідні дані до розрахунку Завдання 4.2

1 варіант					2 варіант					3 варіант					4 варіант					5 варіант					6 варіант				
Кут	ППТ що тарується, мм		Зразковий ППТ, мм		Кут	ППТ що тарується, мм		Зразковий ППТ, мм		Кут	ППТ що тарується, мм		Зразковий ППТ, мм		Кут	ППТ що тарується, мм		Зразковий ППТ, мм		Кут	ППТ що тарується, мм		Зразковий ППТ, мм		Кут	ППТ що тарується, мм		Зразковий ППТ, мм	
	$\varphi, ^\circ$	H	h_{st}	H		h_{st}	$\varphi, ^\circ$	H	h_{st}		H	h_{st}	$\varphi, ^\circ$	H		h_{st}	H	h_{st}	$\varphi, ^\circ$		H	h_{st}	H	h_{st}		$\varphi, ^\circ$	H	h_{st}	H
0	35	5	28	3	0	35	5	28	3	0	20	5	29	3	0	30	5	30	3	0	30	2	30	4	0	20,5	3	30	4
15	34	5	28	3	15	34	5	28	3	15	19	4	30	3	10	30	4	30	2	10	30	2	30	3	10	20	2	30	3
20	29	4	27	3	20	29	4	27	3	20	18	4	30	3	20	26	4	30	3	20	26	2	30	3	20	16	2	30	3
30	25	3	28	3	30	25	3	28	3	30	15	4	31	3	30	20	4	31	3	30	20	1	31	3	30	12	1	31	3
35	18	3	27	3	35	18	3	27	3	35	11	3	27	3	35	11	3	27	3	35	11	1	27	3	35	7	1	27	3
40	10	3	27	3	40	10	3	27	3	40	8	4	27	3	40	8	2	27	3	40	8	1	27	3	40	5	1	27	3
45	1	0	27	3	45	1	0	27	3	45	1	0	27	3	45	1	0	27	3	45	1	0	27	3	45	1	0	27	3
7 варіант					8 варіант					9 варіант					10 варіант					11 варіант					12 варіант				
0	30	3	30	4	0	25	2	30	4	0	20	3	30	4	0	60	11	30	4	0	60	8	30	4	0	45	8	30	4
10	28	1	30	3	10	24	1	30	3	10	19	2	30	3	10	59	10	30	3	10	59	7	30	3	10	44	7	30	3
20	25	2	30	3	20	21	1	30	3	20	16	1	30	3	20	43	8	30	3	20	43	5	30	3	20	36	5	30	3
30	18	1	31	3	30	18	1	31	3	30	13	1	31	3	30	24	1	31	3	30	24	1	31	3	30	24	1	31	3
35	10	1	27	3	35	12	1	27	3	35	9	1	27	3	35	15	1	27	3	35	15	1	27	3	35	15	1	27	3
40	5	1	28	3	40	8	1	28	3	40	5	1	28	3	40	9	1	28	3	40	9	1	28	3	40	9	1	28	3
45	1	0	29	3	45	1	0	29	3	45	1	0	29	3	45	1	0	29	3	45	1	0	29	3	45	1	0	29	3
13 варіант					14 варіант					15 варіант					16 варіант					17 варіант					18 варіант				
0	40	8	30	4	0	32	4	30	4	0	38	5	30	4	0	24	4	30	4	0	32	5	30	4	0	47	5	30	4
10	39	7	30	3	10	31	3	30	3	10	36	4	30	3	10	23	4	30	3	10	29	4	30	3	10	44	4	30	3
20	31	6	30	3	20	26	3	30	3	20	22	3	30	3	20	15	3	30	3	20	20	3	30	3	20	33	3	30	3
30	20	1	31	3	30	18	1	31	3	30	12	1	31	3	30	8	1	31	3	30	10	1	31	3	30	15	2	31	3
35	11	1	27	3	35	11	1	27	3	35	5	1	27	3	35	5	1	27	3	35	5	1	27	3	35	8	1	27	3
40	7	1	28	3	40	7	1	28	3	40	3	1	28	3	40	3	1	28	3	40	3	1	28	3	40	3	1	28	3
45	1	0	29	3	45	1	0	29	3	45	1	0	29	3	45	1	0	29	3	45	1	0	29	3	45	1	0	29	3

Таблиця А5. Вихідні дані до розрахунку Завдання 5

			1 варіант			2 варіант			3 варіант			4 варіант			5 варіант			6 варіант			7 варіант		
№ з/п	Параметр	од. вим.	Режим вентилятору			Режим вентилятору			Режим вентилятору			Режим вентилятору			Режим вентилятору			Режим вентилятору			Режим вентилятору		
			I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
1.	$H, (a-a_0)$	мм	10	16	22	15	20	28	45	58	75	45	58	75	65	80	95	65	80	95	65	80	95
2.	h_{st}	мм	1	2	3	1	2	3	5	8	11	5	8	11	5	8	11	10	15	20	10	15	20
3.	$(H-h_{st})_{инт.тр.}$	мм	2	3	4,5	2,5	3,5	4,5	18,5	24	31	9	11,5	14,5	14	17	20	18	22	27	14	16,5	20
4.	t	°С	25,1	25,2	25,3	28,1	28,3	28,9	25	26,2	26,5	25	26	27	28	29	30	22	25	26	22	25	26
5.	r	%	50	50	50	35	35	36	35	35	36	10	10	10	10	10	10	85	85	85	85	85	85
6.	$P_{бар}$	Па	105000			105000			99900			100250			101500			101500			98650		
			8 варіант			9 варіант			10 варіант			11 варіант			12 варіант			13 варіант			14 варіант		
№ з/п	Параметр	од. вим.	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
			I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
1.	$H, (a-a_0)$	мм	81	97	116	81	97	116	81	97	116	45	53	63	45	53	63	22	32	43	22	32	43
2.	h_{st}	мм	15	20	25	15	20	25	15	20	25	7	12	15	7	12	15	5	8	12	5	8	12
3.	$(H-h_{st})_{инт.тр.}$	мм	14	16,5	20	34	40	49	25	31	37	18	22	26	24	28	34	13	20	26,5	4,5	6,5	9
4.	t	°С	22	25	26	18	19	19,5	22	23	23,5	25	25,5	26	24,5	25	25	20	21	21,5	20	21	21,5
5.	r	%	85	85	85	15	16	15	33	34	35	55	55	55	55	55	55	70	70	70	70	70	70
6.	$P_{бар}$	Па	98650			101325			100000			98900			101500			100000			101000		
			15 варіант			16 варіант			17 варіант			18 варіант											
№ з/п	Параметр	од. вим.	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III									
			I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III									
1.	$H, (a-a_0)$	мм	22	32	43	22	32	43	22	32	43	120	180	240									
2.	h_{st}	мм	5	8	12	5	8	12	5	8	12	30	48	70									
3.	$(H-h_{st})_{инт.тр.}$	мм	5,5	8	11	8	11	14	14,5	20	27	60	90	120									
4.	t	°С	18	18,5	19	18	18,5	19	25	25	26	28	28,5	29									
5.	r	%	35	35	35	35	35	35	35	35	35	55	55	55									
6.	$P_{бар}$	Па	100000			1000000			98900			101325											

Таблиця А6. Вихідні дані до розрахунку Завдання 6

Прилад	1 варіант			2 варіант			3 варіант			4 варіант			5 варіант			6 варіант		
	Режим вентилятору			Режим вентилятору			Режим вентилятору			Режим вентилятору			Режим вентилятору			Режим вентилятору		
	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I		
Термоанемометр	5,61	7,06	8,38	5,93	7,3	8,38	15,5	18,9	21,3	15,5	17,3	21,3	15,5	17,8	21,3	17,7	19,5	21,3
Анемометр	5,68	7,38	8,9	6,1	7,65	8,9	17,5	20,2	23,5	13,1	14,8	16,4	15,2	16,5	16,4	17,1	19	20,5
	7 варіант			8 варіант			9 варіант			10 варіант			11 варіант			12 варіант		
Термоанемометр	17,7	19,5	21,3	16,1	17,9	19,8	24	26	29	21	23	26	18	21	24	19,5	22	25
Анемометр	17,1	19	20,5	17,1	19	20,5	23,5	25	28	20,5	22,5	24,7	17,5	19,5	21	18,5	20,5	22,5
	13 варіант			14 варіант			15 варіант			16 варіант			17 варіант			18 варіант		
Термоанемометр	15	17,5	21	8	10	12	10	12	14	10	12	14	15	18,5	21	32	39	46
Анемометр	16	18,5	21,8	9	10,5	12,2	8,5	10,5	12,2	8,5	10,5	12,2	16	20	24	31	38	44

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 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.