



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

АЕРОДИНАМІКА ВЕНТИЛЯЦІЇ

Методичні вказівки

до виконання лабораторних робіт для здобувачів першого
(бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю
192 «Будівництво та цивільна інженерія»
ОПП «Теплогазопостачання і вентиляція»

Київ 2024

УДК 697.92

A33

Укладачі: В.О. Мілейковський, докт. техн. наук, професор
Д.І. Вакуленко, асистентка
В.Р. Вахула, асистент

Рецензентка А.С. Москвітіна, к-т техн. наук, доцент

Відповідальний за випуск К.М. Предун, д-р екон. наук, професор

*Затверджено на засіданні кафедри теплогазопостачання
і вентиляції, протокол № 1 від 05 серпня 2024 року.*

В авторській редакції.

Аеродинаміка вентиляції: Методичні вказівки до виконання
A33 лабораторних робіт / Уклад.: Мілейковський В.О.,
Вакуленко Д.І., Вахула В.Р. – Київ: КНУБА, 2024. –40 с.

Розглянуто методики виконання лабораторних робіт з дисципліни
«Аеродинаміка вентиляції». Значна увага приділяється
експериментальним методам дослідження вентиляційних систем.

Призначено для студентів денної та заочної форми навчання спе-
ціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» галузі знань 19
«Архітектура та будівництво».

ЗМІСТ

Загальні положення.....	5
Лабораторна робота №1 Вимірювання тисків у системах вентиляції.....	5
1.1. Теоретичні основи	5
1.2. Прилади і методики вимірювання	6
1.3. Виконання роботи.....	14
1.4. Оброблення результатів вимірювань.....	14
Лабораторна робота №2 Визначення витрати повітря в перерізі повітроводу. визначення витрати повітря в отворах і прорізах...	16
2.1. Визначення витрати повітря в перерізі повітроводу	16
2.1.1 Теоретичні основи	16
2.1.2. Проведення вимірювань.....	18
2.1.3. Оброблення результатів вимірювань.....	18
2.2. Визначення витрати повітря в отворах та прорізах	20
2.2.1. Прилади і методики вимірювання	20
2.2.2. Проведення вимірювань.....	23
2.2.3. Оброблення результатів вимірювань.....	24
Лабораторна робота № 3 Вимірювання витрати повітря за допомогою стаціонарних витратомірних пристроїв	25
3.1. Прилади і методики вимірювання	25
3.2. Проведення вимірювань та оброблення результатів	26
Лабораторна робота № 4 Вимірювання втрат тиску за довжиною	31
4.1. Теоретичні основи	31
4.2. Опис лабораторної установки	33
4.3. Проведення вимірювань.....	34
4.4. Оброблення результатів вимірювань.....	34
Лабораторна робота № 5 Обтікання будівлі повітряним потоком в	

аеродинамічній трубі.....	37
5.1. Теоретичні основи	37
5.2. Опис лабораторної установки	38
5.3. Заходи безпеки при роботі в аеродинамічній трубі	40
5.4. Проведення вимірювань.....	41
5.5. Оброблення результатів вимірювань.....	41
Список використаних та рекомендованих джерел.....	43

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Мета лабораторних робіт – вивчення основних аеродинамічних законів руху повітря у системах вентиляції, зокрема дослідження розподілу тиску та швидкості повітря в каналах вентиляційних систем та закономірності розвитку струминних течій.

У ході робіт розглядаються експериментальні методи, які використовуються при налагоджуванні вентиляційних систем, розробленні та сертифікації їхніх елементів: вимірювання тисків, витрати повітря, втрат тисків та дослідження обтікання вітровим потоком циліндра. Роботи виконують з використанням сучасної вимірювальної техніки для аеродинамічних досліджень

Лабораторні роботи сприяють розвитку навичок експериментальної роботи, вимірювання, оброблення та аналізу результатів, що є ключовими компетенціями для бакалаврів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво».

Лабораторна робота №1 ВИМІРЮВАННЯ ТИСКІВ У СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦІЇ

1.1. Теоретичні основи

Тиск – це сила F , Н, віднесена до одиниці площі A , м²:

$$P = F/A, \text{ Па.} \quad (1.1)$$

Помножимо чисельник і знаменник на довжину шляху потоку l , м, та одержимо енергію E , Дж, віднесену до об'єму повітря W , м³:

$$P = F \cdot l/A \cdot l = E/W, \text{ Па.} \quad (1.2)$$

Існує три види тиску: статичний, динамічний та повний (табл. 1.1).

Види тиску повітря

Тиск	Формула	Енергія	Напрямок	Знак	Примітки
Надлишковий статичний*	$\Delta P_c = P_c - P_a$	Потенціальна	Усі напрямки	«←», 0, «→»	P_a – атмосфер. тиск
Динамічний	$P_d = \rho \cdot v^2 / 2$	Кінетична	Напрямок руху	0, «→»	ρ – густина, v – швидк.
Повний	$P_n = \Delta P_c + P_d$	Повна		«←», 0, «→»	

* – тиск незмінний у перерізі прямої ділянки повітроводу, але змінний за її довжиною

За відомим динамічним тиском визначається швидкість повітря:

$$v = (2 \cdot P_d / \rho)^{1/2}. \quad (1.3)$$

1.2. Прилади і методики вимірювання

Вимірювання тисків виконують манометрами. **Манометр** – вимірювальний прилад (вимірювальна установка) для вимірювання тиску або різниці тисків. **Манометр абсолютного тиску** – це пристрій, призначений для вимірювання тиску понад абсолютний вакуум. Такий тип манометрів широко використовується в різних галузях, зокрема в нафтогазовій промисловості, хімічній промисловості та аерокосмічній техніці. **Манометр надлишкового тиску** – манометр для вимірювання різниці між абсолютним тиском, що перевищує абсолютний тиск навколишнього середовища, і абсолютним тиском навколишнього середовища. **Напоромір** – манометр надлишкового тиску в газових середовищах з верхньою межею вимірювання не більше 40 кПа. **Вакуумметр** – манометр для вимірювання тиску розрідженого газу. **Тягомір** – вакуумметр з верхньою межею вимірювання не більше 40 кПа. **Мановакуумметр** – манометр для вимірювання надлишкового тиску і тиску розрідженого газу. **Тягонапоромір** – мановакуумметр для газових середовищ з верхньою межею вимірювання не більше 20 кПа. **Диференційний манометр (дифманометр)** – манометр для вимірювання різниці двох тисків. **Мікроманометр** – дифманометр з

верхньою межею вимірювання не більше 40 кПа. **Вимірювальний перетворювач тиску** – первинний перетворювач, який сприймає безпосередньо вимірюваний тиск і перетворює його на іншу фізичну величину.

Принцип дії **рідинних манометрів** базується на врівноваженні вимірюваного тиску (різниці тисків) тиском стовпа рідини. **U-подібний манометр** (рис. 1.1, *a* та рис. 1.1, *б*) – це дві сполучені внизу вертикальні трубки та лінійка. Без тиску (рис. 1.1, *a*) рівень рідини в трубках однаковий. До вільних кінців трубок подають тиски $P_1 > P_2$ (рис. 1.1, *б*). Рівень рідини в трубці під тиском P_1 знизиться, а під тиском P_2 – підвищиться. Відлік H , м – це різниця рівнів. Рівняння рівноваги відносно рівня 0-0:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \rho_p \cdot g \cdot H, \text{ Па}, \quad (1.4)$$

де ρ_p – густина рідини, кг/м^3 , $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння.

Основним недоліком приладу є низька чутливість. Для підвищення чутливості можна використати оптичну систему, яка ковзає вздовж трубок і тримається мікрометричним гвинтом. Такі оптичні мікроманометри не набули широкого розповсюдження з причини складності конструкції.

Натомість, як високоточні еталонні прилади використовуються **двочашкові мікроманометри** (рис. 1.1, *в*), які складаються зі сполучених рухомого і нерухомого баків. Останній має оптичну систему, яка дозволяє контролювати незмінний рівень рідини h_1 в ньому. Рухомий бак піднімається і опускається обертанням мікрометричного гвинта. Це – гвинт з точною різьєю, який дозволяє встановити бак на різну висоту з точністю 5...10 мкм і вище. Більший тиск подається до нерухомого бака. Рівень рідини в ньому падає, а в рухомому – підвищується.

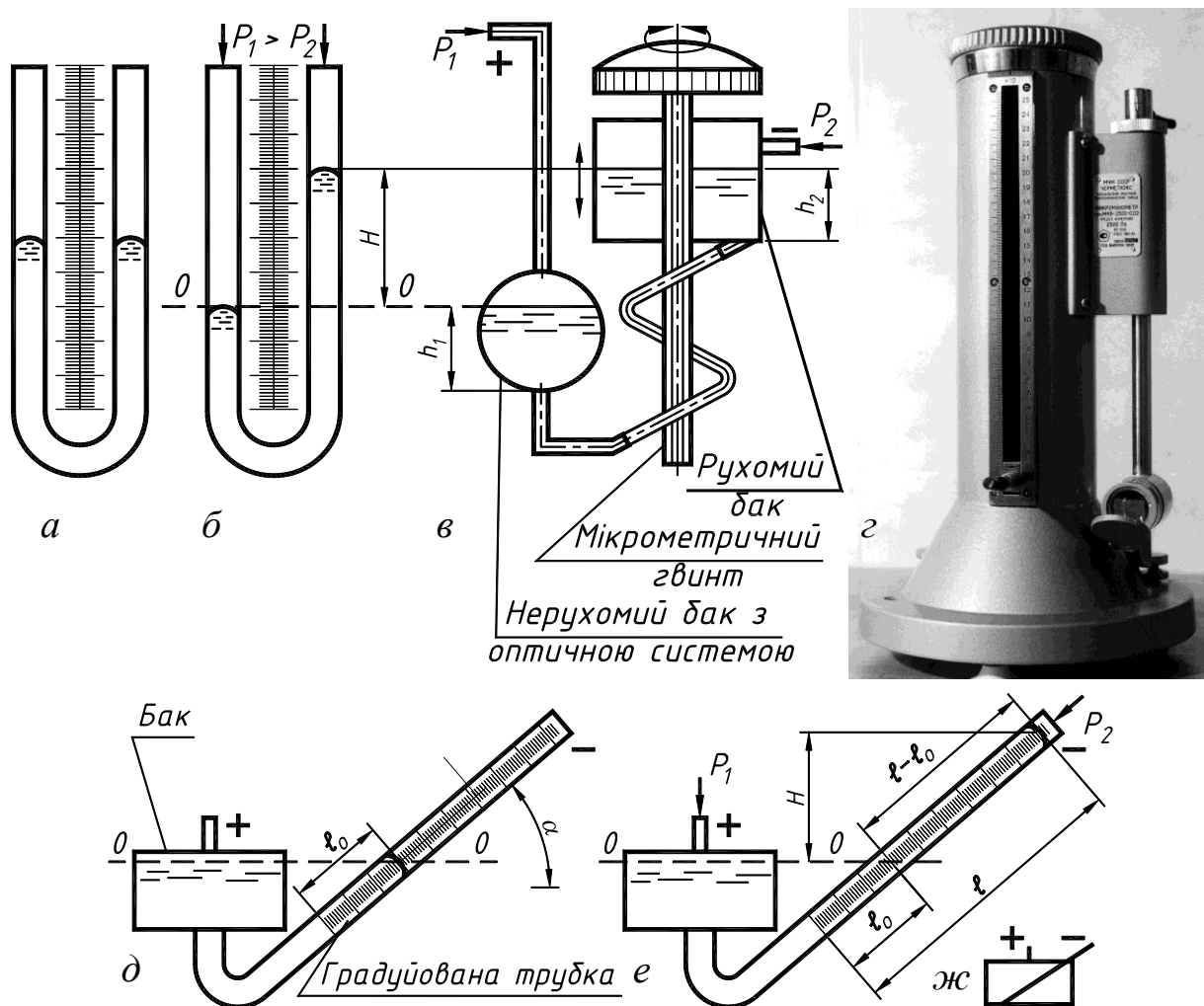


Рис. 1.1. Рідинні дифманометри:

a – U-подібний, *б* – те ж під тиском, *в* – двочашковий, *г* – МКВ-2500,
д – чашковий, *е* – те ж під тиском, *ж* – умовне позначення мікроманометра
(яке можна застосувати до будь-якого його типу)

При підніманні рухомого бака рідина перетікатиме з нього в нерухомий, і рівень рідини h_1 (а разом з ним – h_2) повертається в початкове положення. У цей момент за мікрометричним гвинтом знімається відлік H . Для двочашкових мікроманометрів справедлива формула (1.4), але значення прискорення вільного падіння g береться місцева (для Києва $9,81047 \text{ м/с}^2$). Густина ρ_r , кг/м^3 , приймається залежно від температури навколишнього середовища. На покази приладу впливає розчинене у рідині повітря, тому після перенесення або заповнення прилад слід відстоювати.

Наприклад, двочашкові мікроманометри типу МКВ-2500 мають похибку 0,5 Па. Ці прилади до сьогодні виконують роль еталонів. Найбільш точні з двочашкових мікроманометрів обладнані датчиками температури робочого середовища для точного обчислення його густини, що дозволяє досягти похибки 0,1 Па.

Для технічних вимірювань застосовуються більш прості **чашкові манометри**. Ідея чашкового мікроманометра (рис. 1.1, *д*) полягає у тому, що в U-подібному мікроманометрі одна трубка замінюється баком, переріз якого в 700 і вище разів більший за переріз трубки. Тоді при перетіканні рівень рідини в баку змінюється більше ніж в 700 разів повільніше, ніж у трубці. Наприклад, при повному заповненні рідиною трубки завдовжки 300 мм рівень рідини в баку зміниться менше ніж на 0,4 мм. Цією зміною можна нехтувати.

Для підвищення точності взяття відліку друга проградуєвана трубка виконується нахиленою під постійним або змінним кутом α , *град*. Такі прилади з постійним кутом можна зустріти на окремих фільтрах для простого і дешевого контролю за станом.

Розглянемо чашковий манометр без тиску (рис. 1.1, *д*). Рівень рідини у баку і у трубці є однаковим. При цьому меніск рідини розташований біля позначки ℓ_0 , мм, яка називається «умовний нуль». Розглянемо цей же манометр під тиском (рис. 1.1, *е*). Більший тиск P_1 , Па, завжди подається до баку (штуцер «+»), а менший тиск – до вільного кінця трубки (штуцер «-»). Рівень рідини у трубці піднімається на висоту H , м, а меніск стає навпроти позначки шкали ℓ , мм. Тоді рівняння (1.4) рівноваги для нульового рівня 0-0 набуде вигляду:

$$\begin{aligned}\Delta P = P_2 - P_1 &= \rho_p \cdot g \cdot H = C \cdot \rho_p \cdot g \cdot (\ell - \ell_0) \cdot \sin(\alpha) = \\ &= (C \cdot \rho_p \cdot \sin(\alpha)) \cdot (\ell - \ell_0) \cdot g, \text{ Па},\end{aligned}\tag{1.5}$$

де C – градуєвальний коефіцієнт, близький до одиниці, який враховує зниження рідини у баку, похибки пристроїв для встановлення кута нахилу трубки тощо.

Цей коефіцієнт встановлюється при градуюванні приладу – порівнянні його показів з показами більш точного еталонного приладу, наприклад, МКВ–2500.

Умовне позначення мікроманометра наведено на рис. 1.1, *ж*.

На сьогодні рідинні манометри застосовують лише як еталони, і як виняток, для контролю фільтрів. Як зазначалося, еталонний манометр перед вимірюванням має бути нерухомим довгий час (для МКВ-2500 – дві доби), щоб унеможливити наявність бульбашок повітря. Тому він непридатний для натурних досліджень. Він вимагає високоякісної стабілізації течії.

Для більшості задач використовують більш зручні електронні мікроманометри через перевершення ними точності переносних чашкових мікроманометрів. Вони складаються з перетворювача вимірювального тиску на електричний сигнал та обчислювача, який за електричним сигналом підраховує тиск.

Найбільш розповсюджені вимірювальні перетворювачі тиску (рис. 1.2, *а*) складаються з мембрани, на яку наклеєний п'єзоелектричний або тензоелектричний перетворювач деформації. П'єзоелектричний перетворювач – це спеціальний п'єзоелемент, тобто хімічна сполука, при деформації якої виникає електрорушійна сила.

Тензоелемент (рис. 1.2, *б*) – це довгий дріт. При розтягуванні дроту збільшується його довжина та зменшується поперечний переріз, що призводить до зростання електричного опору.

Проблемою всіх деформаційних датчиків є гістерезис. Після зняття тиску, датчик не повертається у вихідне положення. Щоб вивести їх на нульову позначку до них слід прикласти перепад тиску протилежного знаку. Тому деформаційні манометри передбачають процедуру калібрування нуля при кожному ввімкненні та від'єднанні від установки.

Сучасний мікроманометр (рис. 1.2, *в*) – це компактний пристрій з двома штуцерами «+» та «-». Він має кнопку живлення « ⏻ », а також може мати кілька додаткових кнопок для ручного калібрування нуля, вибору розмірності, автоматичного розрахунку швидкості за динамічним тиском тощо залежно від виробника та моделі. Переважна

більшість з них автоматично калібруються при ввімкненні та від'єднанні від стенду.

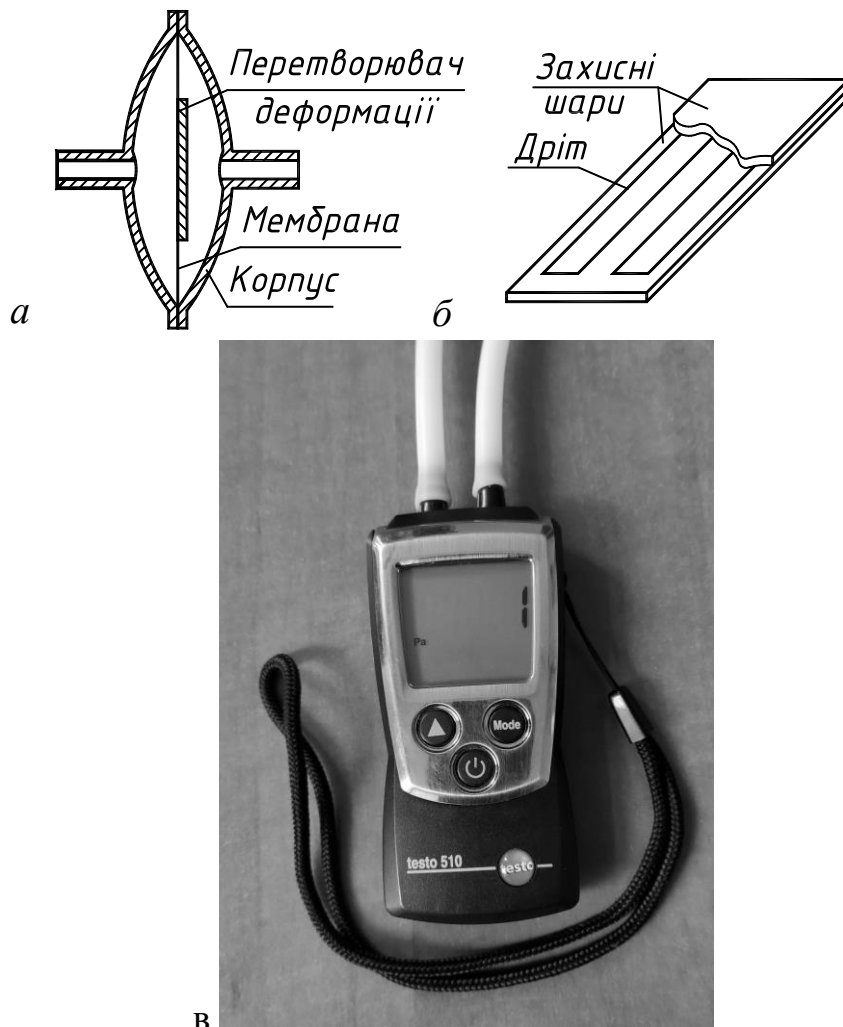


Рис. 1.2. Електронні манометри:

a – схема перетворювача, *б* – тензoeлемент, *в* – мікроманометр Testo-510

Не допускається вмикати мікроманометр під тиском, адже він буде відтворювати накопичений гістерезис у кожному показі. Мікроманометр використовують таким чином:

- за наявності відкривають захисну кришку;
- за потреби можна приєднати прилад до трубки Піто-Прандтля, яка має перебувати під атмосферним тиском у нерухомому повітрі;
- вмикають і чекають нульового показу, що свідчить про калібрування нуля;

- приєднують прилад до тиску: «+» до більшого абсолютного тиску, «-» – до меншого, у випадку використання під час вимірів трубки Піто-Прандтля, вставляють її в потрібне положення і записують покази;
- за потреби тривалих вимірювань змінного тиску прилад треба періодично від'єднувати від тиску і калібрувати нуль, для чого слід дочекатися нульового показу (у даному випадку). Деякі моделі вимагають натиснути відповідну кнопку або кнопку «ввімкнути-вимкнути».
- після завершення вимірювань прилад вимикають і, за наявності, накривають захисною кришкою.

Не менш важливим є відбір тиску. Статичний тиск у повітроводах діаметром до 500 мм для технічних вимірювань відбирається одним штуцером. Для більших діаметрів або лабораторних досліджень встановлюється не менше чотирьох штуцерів, з'єднаних трубкою для усереднення тиску (Рис. 1.3, а).

Для вимірювання всіх видів тиску застосовується комбінований приймач тиску – пневмометрична трубка (Рис. 1.3, б). Носик цієї Г-подібної трубки (менша частина) на кінці сферичний і має отвір, сполучений зі штуцером «+». На бічній поверхні носика є отвори, сполучені зі штуцером «-». Діаметр трубки не повинен перевищувати 8 % внутрішнього діаметра круглого або меншої сторони прямокутного повітроводу. Нижня межа чутливості пневмометричних трубок – $v = 4$ м/с – навіть з використанням еталонного манометра. Адаже за меншої швидкості її коефіцієнт стає непередбачуваним. Проградувати її стає неможливим.

Робоче положення трубки – носиком проти потоку. Отвір на кінці носика опиняється під дією статичного і динамічного, тобто **повного тиску**, який передається до штуцера «+». Бічні отвори знаходяться під дією лише статичного тиску. Адаже в нормальному напрямку динамічний тиск не діє, а на штуцер «-» передається **статичний тиск**. Для визначення динамічного тиску необхідно виміряти різницю між статичним і повним тиском, тобто перепад тиску між штуцерами «+» і «-».

Правила вимірювання тисків наведені на рис. 1.3, в, з, д. Динамічний тиск завжди додатний. Пневмометрична трубка з мікроманометром з'єднуються двома гнучкими трубками: «плюс» до «плюса», «мінус» до «мінуса» (рис. 1.3, з).

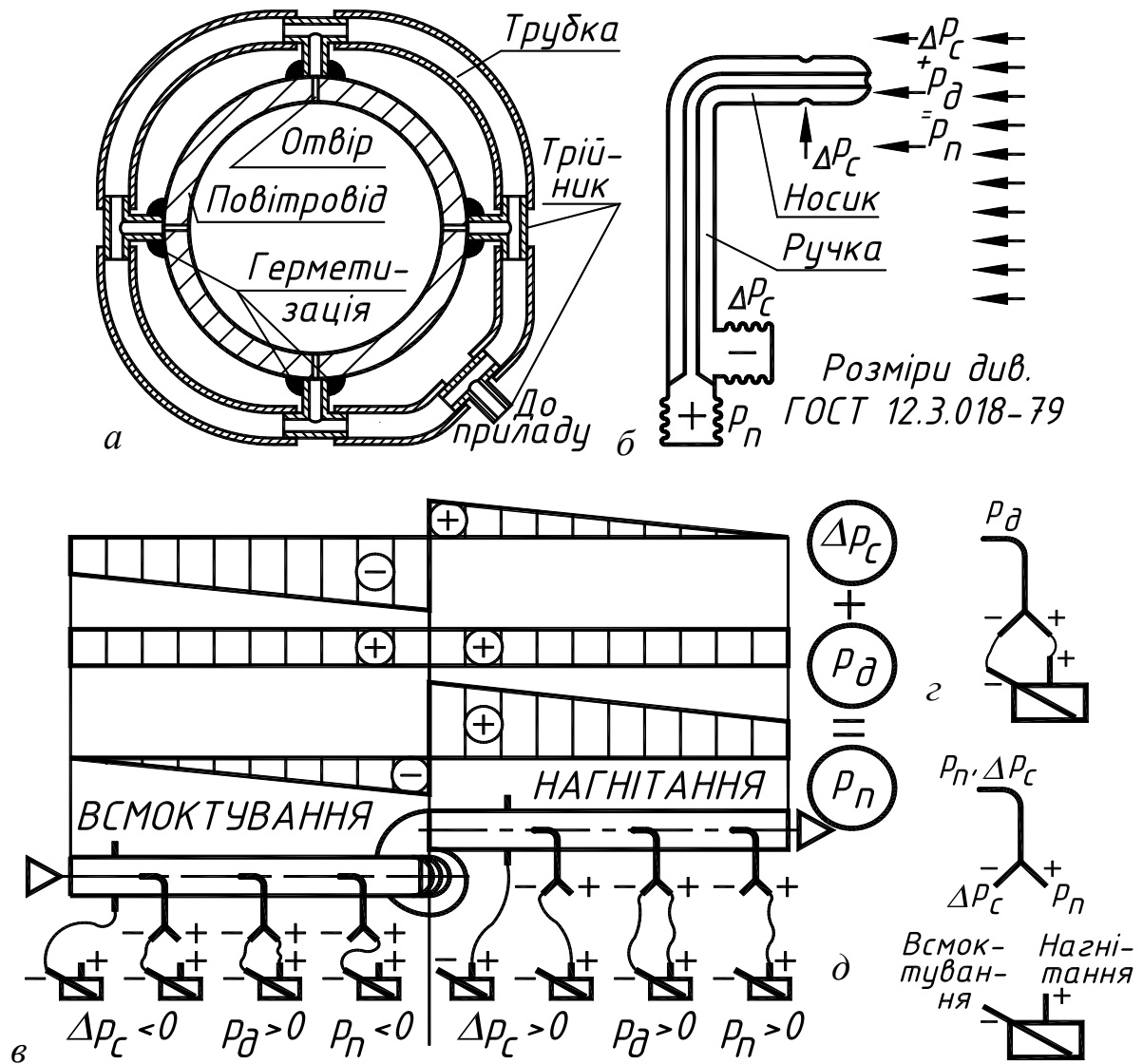


Рис. 1.3. Вимірювання тиску:

а – кільце усереднення статичного тиску, б – пневмометрична трубка в – схема вимірювання тисків, з – правило вимірювання динамічного тиску, д – те ж надлишкового статичного і повного тисків

Для вимірювання інших тисків пневмометрична трубка приєднується до мікроманометра однією гнучкою трубкою. На трубці береться «плюс» для повного тиску, а «мінус» – для надлишкового статичного. На мікроманометрі береться «плюс» на нагнітанні, «мінус» на всмоктуванні (Рис. 1.3, *д*).

Перед використанням пневмометричні трубки градуують для визначення коефіцієнта K_{mp} . Його вводять до динамічного тиску.

Вимірювати слід у перерізах прямих ділянок повітроводів не ближче шести гідравлічних (еквівалентних) діаметрів після останнього збурення (місцевого опору) та не ближче двох діаметрів перед ним. За відсутності таких прямих ділянок допускається вимірювати у перерізі, що ділить пряму ділянку у відношенні 3:1 у напрямку потоку. Однак, при лабораторних дослідженнях слід пам'ятати, що певні збурення діють протягом 50 калібрів.

1.3. Виконання роботи

На ручці пневмометричної трубки робиться помітка на відстані від осі носика, що дорівнює радіусу круглого перерізу або половині розміру прямокутного перерізу. Після запуску вентилятора трубка занурюється в отвір до помітки. Вимірюються статичний, динамічний та повний тиски. Результати заносяться до табл. 1.2.

1.4. Оброблення результатів вимірювань

Визначається нев'язка між тисками. Осьова швидкість визначається за формулою (1.3). Допускається приймати густину повітря $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$. Далі робиться висновок щодо якості вимірювань. Якщо $\varepsilon \leq 10 \%$, то похибка вимірювань допустима, $\varepsilon > 10 \%$ – похибка недопустима. Зазначаються причини похибки, наприклад, неточність встановлення трубки.

Таблиця дослідних і розрахункових даних

Площа перерізу ($A = \pi \cdot D^2/4$ або $A = a \cdot b$). $A =$ _____ м².

Густина повітря $\rho = 1,2$ кг/м³.

Тиск	Значення тиску, Па
Надлишковий статичний ΔP_c	
Динамічний P_d	
$\Delta P_c + P_d$	
Повний P_n	

Нев'язка $\varepsilon = 100 \cdot (P_n - (\Delta P_c + P_d)) / P_n =$ _____ %.

Швидкість $v = (2 \cdot P_d / \rho)^{1/2} =$ _____ м/с.

Висновок: _____

Лабораторна робота №2
ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТИ ПОВІТРЯ В ПЕРЕРІЗІ
ПОВІТРОВОДУ. ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТИ ПОВІТРЯ В
ОТВОРАХ І ПРОРІЗАХ

При виконанні даної роботи спочатку вимірюють витрату повітря в перерізі повітроводу аеродинамічного стенда. Далі переходять до вимірювання витрати повітря у прорізі дверей.

2.1. Визначення витрати повітря в перерізі повітроводу

2.1.1 Теоретичні основи

Витрата повітря – це кількість повітря, що проходить через переріз за одиницю часу. Якщо кількість повітря – це об’єм, м³, то витрата називається **об’ємною** L , м³/с або м³/год. Якщо кількість повітря – це маса, кг, то витрата називається **масовою** G , кг/с (кг/год).

Швидкість у перерізі є змінною (рис. 2.1). При відомому профілі швидкості відомий і **коефіцієнт поля швидкості** – **відношення середньої швидкості** $v_{сер}$, м/с, до **осьової** $v_{ос}$, м/с:

$$K_{n.u.} = v_{сер}/v_{ос}. \quad (2.1)$$

Тоді середня швидкість становить

$$v_{сер} = K_{n.u.} \cdot v_{ос}, \text{ м/с}. \quad (2.2)$$

Для розвиненого турбулентного потоку в повітроводах $K_{n.u.} = 0,8 \dots 0,9$.

Об’ємна витрата повітря в перерізі площею A , м²:

$$L = v_{сер} \cdot A, \text{ м}^3/\text{с}; L = 3600 \cdot v_{сер} \cdot A, \text{ м}^3/\text{год}. \quad (2.3)$$

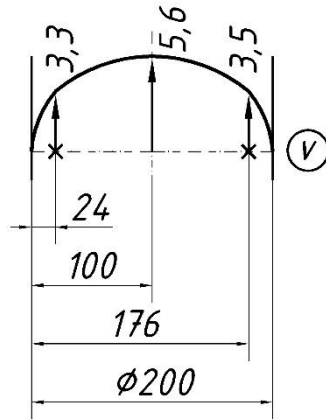


Рис. 2.1. Приклад експериментального профілю швидкості у повітроводі

Масова витрата повітря становить

$$G = \rho \cdot v_{сер} \cdot A, \text{ кг/с}; G = 3600 \cdot \rho \cdot v_{сер} \cdot A, \text{ кг/год.} \quad (2.4)$$

Найбільш уживаним для визначення витрати повітря є **метод однакових площ**. Переріз ділиться на n частин рівної площі:

$$A_i = A/n, \text{ м}^2. \quad (2.5)$$

Витрата L , м³/год, дорівнює сумі витрат L_i , м³/год, частин перерізу, а середня швидкість v_i , м/с, у кожній частині береться як швидкість у центрі її ваги або в точці, у якій при профілі швидкості розвиненої турбулентної течії маємо швидкість, рівну середній швидкості у відповідній частині. Тоді:

$$L = \sum L_i \approx \sum v_i \cdot A_i = A/n \cdot \sum v_i = A \cdot (\sum v_i/n) = A \cdot v_c, \quad (2.6)$$

де v_c – приблизне значення середньої швидкості в перерізі, м/с:

$$v_{сер} \approx v_c = \sum v_i/n. \quad (2.7)$$

Коефіцієнт поля швидкостей:

$$K_{n.ш.} = v_{сеп}/v_{ос} \approx v_c/v_{ос}. \quad (2.8)$$

З достатньою точністю використовуються розбиття перерізу на рис. 2.2.

2.1.2. Проведення вимірювань

Перед вимірюваннями на ручку пневмометричної трубки наносять позначки на відстанях від осі носика трубки, регламентованих рис. 2.2. Для вимірювання осьової швидкості наноситься позначка, що відповідає радіусу (половині розміру) перерізу. Результати заносяться до табл. 2.1. На кресленнях перерізів відмічаються порядкові номери точок, що відповідають табл. 2.1.

2.1.3. Оброблення результатів вимірювань

Підраховуються швидкості за формулою (2.3), середня швидкість за залежністю (2.7), об'ємна витрата за формулою (2.6) і коефіцієнт поля швидкості за формулою (2.8).

Будуються профілі (графіки, епюри) швидкості повітря для кожної лінії вимірювання. У масштабі відкладається лінія. На ній виставляються точки вимірювання (для круглого перерізу обов'язково осьова). Від цих точок перпендикулярно осі відкладаються вектори швидкості, довжина яких відповідає швидкостям у певному масштабі.

На краях перерізу швидкість дорівнює нулю. Кінці лінії та векторів швидкості сполучаються плавною лінією. Над кінцями векторів наносяться значення швидкості. Показуються стінки та розмір повітроводу. Приклад побудови профілів швидкості див. рис. 2.1.

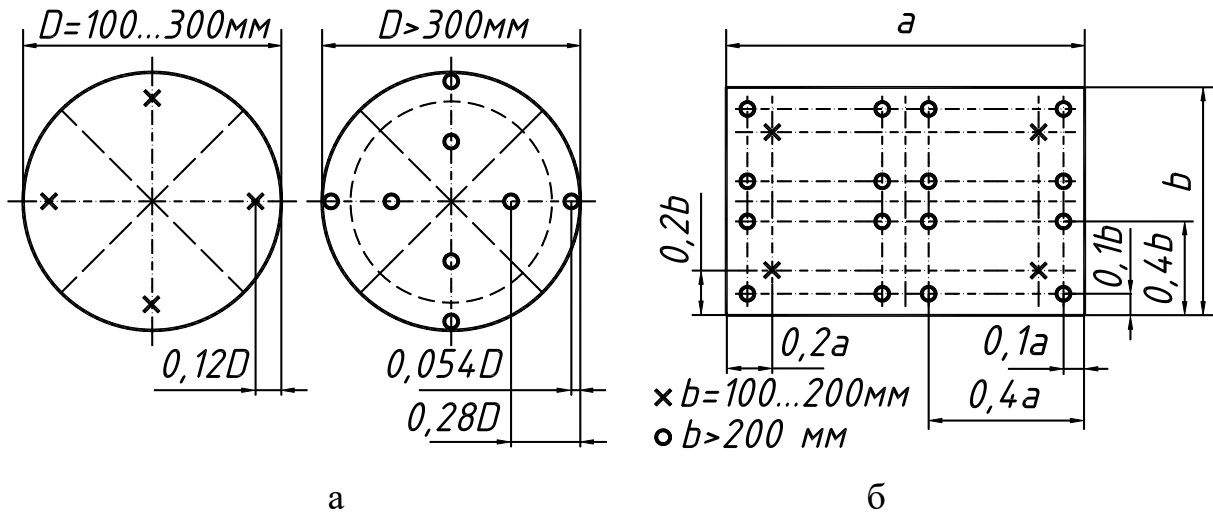


Рис. 2.2. Вимірювання витрати повітря в перерізі:
a – круглому, *б* – прямокутному

Таблиця 2.1

Таблиця дослідних і розрахункових даних

Площа перерізу ($A = \pi \cdot D^2/4$ або $A = a \cdot b$). $A =$ _____ м^2 .

Точка	$P_{d,i}$ Па	$v_i = (2P_{d,i}/\rho)^{1/2}$, м/с	$L \approx 3600 \cdot v_c \cdot A$, $\text{м}^3/200\text{д}$	$K_{n,u} = v_c/v_{oc}$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
Середня	—	$v_c = \sum v_i/n =$ _____		
Осьова				

2.2. Визначення витрати повітря в отворах та прорізах

2.2.1. Прилади і методики вимірювання

При визначенні повітрообміну приміщень виникає задача вимірювання витрати повітря у вентиляційних отворах, віконних, дверних та аераційних прорізах тощо. При цьому швидкості повітря можуть не перевищувати 4 м/с – межі чутливості пневмометричних трубок. Необхідно використовувати прилади для прямого вимірювання швидкості повітря – **анемометри**. Найбільш розповсюджені два типи анемометрів – крильчасті (чашкові) та термоелектричні.

Крильчастий анемометр складається з крильчатки, що сприймає рух повітряного потоку, та перетворювача, що перетворює частоту обертання на електричний сигнал, приєднаного до електронного обчислювача, який дає готове значення швидкості. Метод роботи **термоелектричного анемометра** заснований на залежності між тепловіддачею нагрітого тіла, розміщеного в потоку повітря, і швидкістю його обтікання.

Датчики швидкості виконуються як «нагріта куля» (рис. 2.3, *a*) або дротяними (рис. 2.3, *б*). Останні виконуються відкритими або у захисному кожусі з отворами. «Нагріта куля» не залежить від напрямку руху.

Дротяні датчики розміщуються ниткою перпендикулярно до напрямку потоку. На захисному кожусі нанесено напрямок потоку стрілочкою, написами на отворах «in» (вхід) та «out» (вихід) тощо. Крім швидкості, тепловіддача залежить від температури. Тому датчик швидкості 1 завжди поєднується з датчиком температури 2.

Крильчасті анемометри та **термоелектроанемометри** виконують або з безпосереднім з'єднанням датчика та обчислювача або зі з'єднанням каналом радіозв'язку. Останні можуть приєднуватися до спеціальних реєстраторів даних або мобільних телефонів, планшетів чи персональних комп'ютерів. Датчики можуть бути фіксованої довжини або телескопічні.

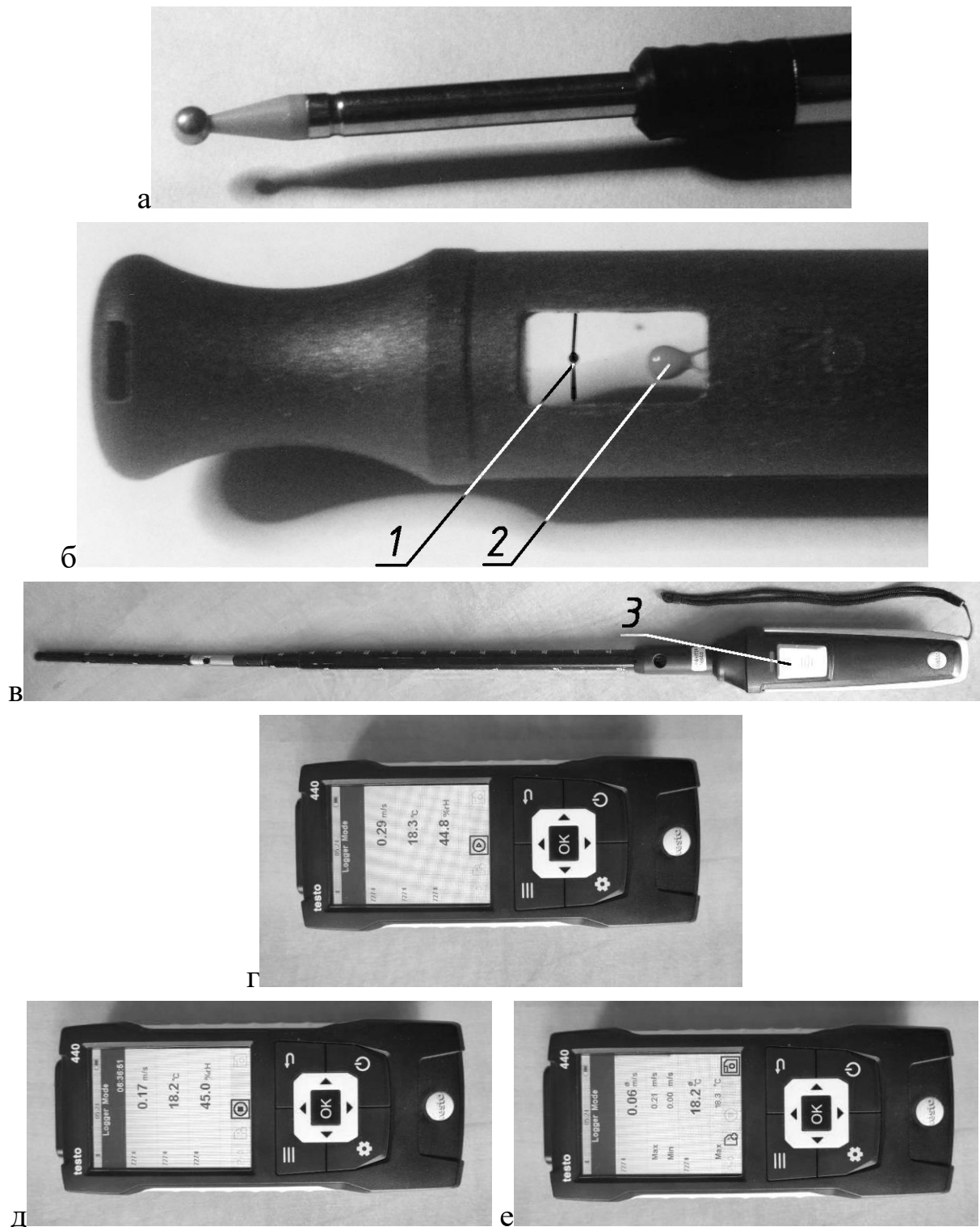


Рис. 2.3. Термоелектроанемометри:

a – датчик «нагріта куля», *б* – дротяний датчик, *в* – термоанемогігрометр Testo 0635 1571; *г* – реєстратор даних Testo 440 з приєднаним Testo 0635 1571; те ж під час накопичення даних для усереднення; *е* – те ж після завершення накопичення даних, а на екрані усереднені значення:
1 – датчик швидкості; *2* – датчик температури; *3* – кнопка живлення

Датчики типу «нагріта куля» легко очищуються, наприклад, чистим ізопропанолом 99,9 % для запобігання осаду. Крильчасті датчики та нагріті нитки очищенню не підлягають. Тому такі датчики і виконують у захисному корпусі. Відкривати їх можна лише на час вимірювання. В іншому випадку їхній строк служби скорочується.

Термоелектроанемометр Testo 0635 1571 (рис. 2.3, в), який використовується для даної роботи, складається з ручки з єдиною жовтогарячою кнопкою ввімкнення-вимкнення, телескопічного подовжувача та датчика. Перед роботою на ручку одягають телескопічний подовжувач, на який надягають датчик. Далі натискають кнопку до загоряння лампочки. Перед або після цього вмикають реєстратор даних або мобільний телефон / планшет / комп'ютер, вмикають Bluetooth і запускають додаток Testo Smart. Додаток має бути встановлено до початку заняття. Чекають автоматичного приєднання термоелектроанемометра. На дисплеї з'являться швидкість, температура та відносна вологість повітря. Якщо датчик не приєднується, слід упевнитися в наявності значка Bluetooth. Якщо його немає на приладі Testo-440, слід одночасно натиснути дві клавіші «≡» та «↶» протягом трьох секунд.

Для початку усереднення на реєстраторі даних натискають кнопку ОК. Почнеться зворотний відлік часу. Щоб зупинити слід дочекатися завершення часу вимірювання (зворотний відлік на дисплеї) або повторно натиснути ОК. Виставити час можна натисканням кнопки «⚙». Можна вибрати крок у секундах у пункті меню «Measuring interval: in s» та час на усереднення у пункті меню «Measurement duration: in hrs and min». Якщо час вимірювання невідомий, обираємо такий час, який точно ми не перевершимо, наприклад, шість годин.

Заборонено використання приладу з дротяним датчиком в запиленних приміщеннях та потоках. Після роботи з крейдою обов'язково слід вимити руки. Пил безповоротно пошкоджує датчик. Заборонено торкатися чутливих елементів дротяного датчика, оскільки це призведе до механічного пошкодження.

Датчик «нагріта куля» при забрудненні може бути очищений від

пилу неабразивною тканиною. При цьому слід бути обережним, щоб не відламати кульку від ручки.

Для вимірювання витрати повітря в отворах за методом однакових площ схема розбиття перерізу наведена на рис. 2.4, *а*. Крім цього методу використовуються експрес-методи, які передбачають усереднення швидкості потоку під час рівномірного руху датчика в усьому перерізі отвору (рис. 2.4, *б*, *в*). Рухати датчик слід дуже повільно, щоб він встигав реагувати на зміну швидкості повітря.

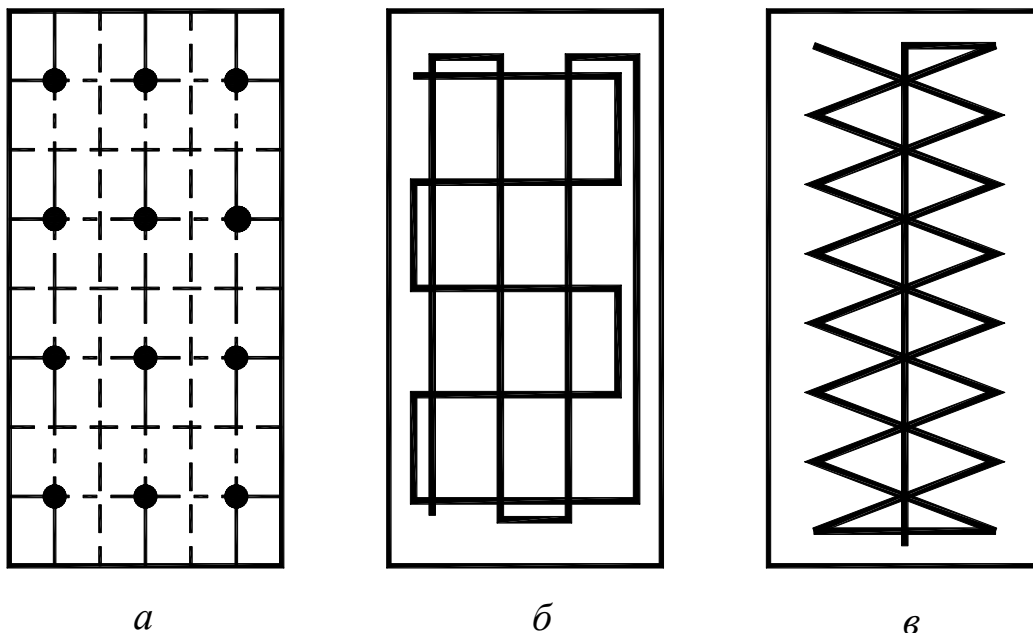


Рис. 2.4. Методи вимірювання витрати в отворах:
а – метод однакових площ; *б*, *в* – експрес-методи

Порядок користування приладом для експрес-методів:

1. Запускають накопичення даних
2. Одразу після цього починають повільний рух датчика.
3. Одразу після завершення руху зупиняють накопичення даних для усереднення.
4. Виписують усереднену швидкість

2.2.2. Проведення вимірювань

За завданням викладача виконуються вимірювання швидкості та витрати повітря за одним із методів.

2.2.3. Оброблення результатів вимірювань

Вимірюються розміри отвору та визначається площа. За методом однакових площ підраховується середня швидкість як середнє арифметичне результатів вимірювання. Масова та об'ємна витрати повітря підраховуються за формулами (2.4) та (2.6).

Таблиця 2.2

Таблиця дослідних і розрахункових даних

Площа отвору ($A = \pi \cdot D^2/4$ або $A = a \cdot b$). $A =$ _____ м²

№	v_i , м/с	$L \approx 3600 \cdot v_c \cdot A$, м ³ /год	$G \approx 3600 \cdot \rho \cdot v_c \cdot A$, кг/год
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
Середня	$v_c = \Sigma v_i / n =$ _____		

Лабораторна робота № 3
**ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ПОВІТРЯ ЗА ДОПОМОГОЮ
СТАЦІОНАРНИХ ВИТРАТОМІРНИХ ПРИСТРОЇВ**

3.1. Прилади і методики вимірювання

При лабораторних дослідженнях систем вентиляції виникає потреба у швидкому й точному визначенні витрати повітря. Для цього використовуються витратомірні пристрої (табл. 3.1).

Особливостями роботи **колектора** є близькі до нуля втрати тиску та рівномірний профіль швидкості (табл. 3.1). Рівняння Бернуллі для перерізів I та II (табл. 3.1) ідеального колектора має вигляд:

$$0 = \Delta P_c + P_\partial = -\Delta P + P_\partial, \quad (3.1)$$

де ΔP – показ мікроманометра, Па.

Отже,

$$\Delta P = P_\partial. \quad (3.2)$$

Формули реальних колекторів наведені у (табл. 3.1). Градувальний коефіцієнт, що враховує втрати тиску в колекторі:

$$\mu_k = K_k^{1/2}, \quad (3.3)$$

Камера тиску є найбільш уживаним витратоміром для лабораторних досліджень. Відношення діаметрів 4,75 забезпечує динамічний тиск у камері 2 на рівні 0,02 % повного.

Довжина камери 2 приймається рівною діаметру. Властивістю сіток 3 є руйнування вихорів, більших за розмір комірки.

Труби Вентурі дають сильний вимірювальний перепад тиску при малих габаритах і втратах тиску. Рівняння (табл. 3.1) одержані з рівнянь Бернуллі та витрати для перерізів I та II:

$$\Delta P_{c,I} + \alpha_I \cdot \rho \cdot v_I^2 / 2 = \Delta P_{c,II} + \alpha_{II} \cdot (\rho \cdot v_{II}^2 / 2) + \xi \cdot \rho \cdot v_{II}^2 / 2, \quad (3.4)$$

$$G = \rho \cdot v_I \cdot (\pi \cdot D^2 / 4) = \rho \cdot v_{II} \cdot (\pi \cdot d^2 / 4). \quad (3.5)$$

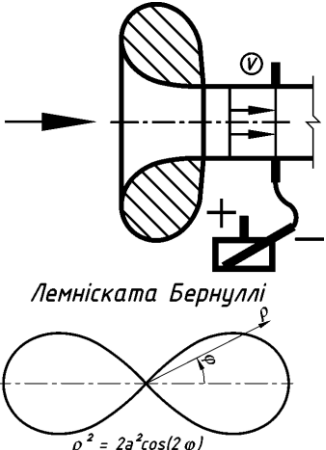
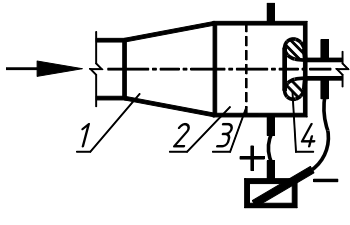
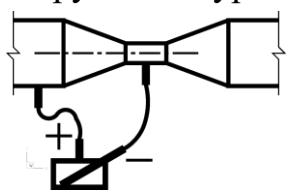
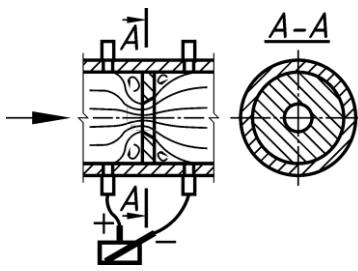
де α_I і α_{II} - коефіцієнти Кориоліса; ξ – коефіцієнт місцевого опору – можуть бути замінені градуювальним коефіцієнтом C .

Діафрагма – це пластина з отвором у повітроводі. Це – один з найбільш простих місцевих опорів та витратомірів. Як витратомір застосовується у деяких дослідних установках, коли тиску повітря достатньо, а збурення потоку не впливають на результати досліджень.

3.2. Проведення вимірювань та оброблення результатів

За завданням виконуються вимірювання витрати повітря за одним, кількома або усіма витратомірами. Результати заносяться у табл. 3.3. Витрата визначається за табл. 3.1, а швидкість – з формули (2.3).

Витратомірні пристрої

Назва, креслення	Принцип дії	Формула
<p>Колектор</p>  <p>Лемніската Бернуллі $\rho^2 = 2a^2 \cos(2\varphi)$</p>	<p>Плавний вхід до повітроводу. Виконується за лемніскатою Бернуллі. Повітря заходить без значних збурень та втрат тиску. Профіль швидкості рівномірний. Недоліки: встановлюється тільки на вході до повітроводів, чутливий до зовнішніх збурень</p>	$L = \mu_k \cdot A_k \cdot (2 \cdot \Delta P / \rho)^{1/2} = A_k \cdot (2 \cdot K_k \cdot \Delta P / \rho)^{1/2}; \quad (3.6)$ $P_d = K_k \cdot \Delta P. \quad (3.7)$
<p>Камера тиску</p> 	<p>Встановлюється у будь-якій точці мережі. У дифузорі 1 потік розширюється без відриву. У камері 2 $v \approx 0$, $P_d \approx 0$, $\Delta P_c \approx P_n$. Сітки 3 руйнують вихори у потоку. Колектор 4 вимірює витрату. Перевага: стабілізує потік</p>	$L = \mu_{km} \cdot A_{km} \cdot (2 \cdot \Delta P / \rho)^{1/2} = A_{km} \cdot (2 \cdot K_{km} \cdot \Delta P / \rho)^{1/2}; \quad (3.8)$ $P_d = K_{km} \cdot \Delta P \quad (3.9)$
<p>Труба Вентурі</p> 	<p>Встановлюється у будь-якій точці мережі. Звуження перерізу повітроводу (звужена частина – горловина). Частина потенціальної енергії переходить у кінетичну.</p>	$G = C \cdot E \cdot (\pi \cdot d^2 / 4) \times (2 \cdot \rho \cdot \Delta P)^{1/2}; \quad (3.10)$ $L = C \cdot E \cdot (\pi \cdot d^2 / 4) \times (2 \cdot \Delta P / \rho)^{1/2}. \quad (3.11)$
<p>Діафрагма</p> 	<p>Встановлюється у будь-якій точці мережі. Місцевий опір. Частина потенціальної енергії перетворюється на теплоту. Недоліки: вимагає на вході стабілізованого потоку, сильно збурює потік, непродуктивно витрачає енергію потоку</p>	<p>Формула Вейсбаха</p> $\Delta P = \xi_d \cdot \rho \cdot v^2 / 2^{**}; \quad (3.12)$ $L = A_d \cdot (2 \cdot \Delta P / \xi_d \cdot \rho)^{1/2}; \quad (3.13)$ $P_d = \Delta P / \xi_d. \quad (3.14)$

* $E = 1 / (1 - (D/d)^4)^{1/2}$ – коефіцієнт швидкості входу, d та D – діаметр, відповідно, горловини та входу, м; ** Значення ξ_d див. табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Дані для визначення коефіцієнта місцевого опору діафрагми

ξ_0	Значення діаметрів отвору діафрагми d_o , мм, при діаметрі повітроводу d , мм														
	100	110	125	140	160	180	200	225	250	280	315	355	400	450	500
0,2	93	102	116	131	148	168	186	210	232	260	293	332	372	418	465
0,4	89	98	111	125	143	161	179	202	223	250	282	319	358	403	448
0,6	87	95	108	122	139	157	174	197	217	243	274	310	348	391	435
0,8	84	93	106	120	135	153	169	192	212	238	268	303	340	382	425
1,1	82	90	103	116	131	149	164	186	206	230	259	293	329	371	412
1,3	81	89	101	114	129	147	162	183	203	227	255	289	324	365	406
1,5	79	87	99	112	127	144	169	180	199	223	251	284	319	359	399
1,8	78	86	98	110	125	142	157	178	196	219	247	280	314	353	392
2,1	77	84	96	109	123	139	154	174	192	216	242	274	308	347	385
2,4	75	83	94	107	121	137	151	171	189	211	238	270	302	340	378
2,8	74	81	92	104	118	134	148	167	185	207	233	263	296	333	370
3,3	72	79	90	102	116	131	145	164	181	203	228	259	290	327	363
3,8	71	78	88	100	113	128	142	160	177	199	224	252	284	320	355
4,5	69	76	86	98	111	126	139	157	173	194	219	248	278	313	347
5,2	68	74	85	95	108	122	136	153	170	190	214	241	272	306	340
6,1	66	73	83	93	106	120	132	149	166	185	209	236	265	298	332
7,1	64	71	81	91	103	117	129	146	162	181	204	230	259	291	324
8,3	63	69	79	88	101	114	126	142	158	176	199	224	252	284	316
9,6	61	67	76	86	98	111	123	139	153	172	193	219	246	277	307
11,2	59	65	74	84	95	109	119	136	149	167	188	214	239	269	299
12,9	68	64	73	82	93	105	116	131	146	163	184	207	233	263	292
15,1	56	62	71	80	91	103	113	128	142	159	179	202	227	255	284
17,6	55	60	69	77	88	99	110	124	138	154	174	196	221	248	276
20,5	53	59	67	75	85	97	107	121	134	150	169	191	214	241	268
24,0	52	57	65	73	83	94	104	117	130	146	164	185	208	234	260
28,0	50	55	63	71	80	91	101	114	126	141	159	179	202	227	252
30,2	49	54	62	70	79	89	99	111	124	139	156	176	199	224	249

**Приклад визначення коефіцієнта місцевого опору діафрагми за
табл. 3.2.**

Для діаметра повітроводу $d = 450$ мм та діаметра отвору діафрагми $d_o = 234$ мм місцевий опір ξ становить 24,0

ξ_o	Значення діаметрів отвору діафрагми d_o , мм, при діаметрі повітроводу d , мм														
	100	110	125	140	160	180	200	225	250	280	315	355	400	450	500
0,2	93	102	116	131	148	168	186	210	232	260	293	332	372	418	465
0,4	89	98	111	125	143	161	179	202	223	250	282	319	358	403	448
0,6	87	95	108	122	139	157	174	197	217	243	274	310	348	391	435
0,8	84	93	106	120	135	153	169	192	212	238	268	303	340	382	425
1,1	82	90	103	116	131	149	164	186	206	230	259	293	329	371	412
1,3	81	89	101	114	129	147	162	183	203	227	255	289	324	365	406
1,5	79	87	99	112	127	144	169	180	199	223	251	284	319	359	399
1,8	78	86	98	110	125	142	157	178	196	219	247	280	314	353	392
2,1	77	84	96	109	123	139	154	174	192	216	242	274	308	347	385
2,4	75	83	94	107	121	137	151	171	189	211	238	270	302	340	378
2,8	74	81	92	104	118	134	148	167	185	207	233	263	296	333	370
3,3	72	79	90	102	116	131	145	164	181	203	228	259	290	327	363
3,8	71	78	88	100	113	128	142	160	177	199	224	252	284	320	355
4,5	69	76	86	98	111	126	139	157	173	194	219	248	278	313	347
5,2	68	74	85	95	108	122	136	153	170	190	214	241	272	306	340
6,1	66	73	83	93	106	120	132	149	166	185	209	236	265	298	332
7,1	64	71	81	91	103	117	129	146	162	181	204	230	259	291	324
8,3	63	69	79	88	101	114	126	142	158	176	199	224	252	284	316
9,6	61	67	76	86	98	111	123	139	153	172	193	219	246	277	307
11,2	59	65	74	84	95	109	119	136	149	167	188	214	239	269	299
12,9	68	64	73	82	93	105	116	131	146	163	184	207	233	263	292
15,1	56	62	71	80	91	103	113	128	142	159	179	202	227	255	284
17,6	55	60	69	77	88	99	110	124	138	154	174	196	221	248	276
20,5	53	59	67	75	85	97	107	121	134	150	169	191	214	241	268
24,0	52	57	65	73	83	94	104	117	130	146	164	185	208	234	260
28,0	50	55	63	71	80	91	101	114	126	141	159	179	202	227	252
30,2	49	54	62	70	79	89	99	111	124	139	156	176	199	224	249

Таблиця дослідних і розрахункових даних до роботи №3

Витратомір	Δp , Па	L , м ³ /с	$v = L/A$, м/с
Колектор Площа перерізу $A_k = \underline{\hspace{2cm}}$ м ² Коефіцієнт $K_k = \underline{\hspace{2cm}}$		$A_k \cdot (2 \cdot K_k \cdot \Delta P / \rho)^{1/2} =$ $= \underline{\hspace{2cm}}$	
Камера тиску Площа перерізу колектора $A_{кт} = \underline{\hspace{2cm}}$ м ² Коефіцієнт $K_{кт} = \underline{\hspace{2cm}}$		$A_{кт} \cdot (2 \cdot K_{кт} \cdot \Delta P / \rho)^{1/2} =$ $= \underline{\hspace{2cm}}$	
Труба Вентурі Діаметр входу $D = \underline{\hspace{2cm}}$ м Діаметр горловини $d = \underline{\hspace{2cm}}$ м Коеф. швидк. виходу $E = 1 / (1 -$ $-(D/d)^4)^{1/2} = \underline{\hspace{2cm}}$		$L = C \cdot E \cdot (\pi \cdot d^2 / 4)$ $\times (2 \cdot \Delta P / \rho)^{1/2} =$ $= \underline{\hspace{2cm}}$	
Діафрагма Діам. повітро- воду $d = \underline{\hspace{2cm}}$ м Площа перерізу $A = \pi \cdot d^2 / 4 = \underline{\hspace{2cm}}$ м ² Діаметр отвору $d_o = \underline{\hspace{2cm}}$ м Коефіцієнт опору $\xi = \underline{\hspace{2cm}}$		$A_o (2 \cdot \Delta P / \xi_o \cdot \rho)^{1/2} =$ $= \underline{\hspace{2cm}}$	

Лабораторна робота № 4
ВИМІРЮВАННЯ ВТРАТ ТИСКУ ЗА ДОВЖИНОЮ

4.1. Теоретичні основи

Одним з основних питань при аеродинамічних розрахунках систем вентиляції є визначення втрат тиску. Втрати тиску ΔP , Па, складаються з втрат тиску за довжиною ΔP_ℓ , Па, та втрат тиску на місцевий опір ΔP_m , Па. Втрати тиску за довжиною на прямій ділянці повітроводу діаметром d , м, та завдовжки ℓ , м, визначаються за формулою Дарсі:

$$\Delta P_\ell = \lambda \cdot (\ell/d) \cdot (\rho v^2)/2 = \lambda \cdot \ell/d \cdot P_d, \text{ Па}, \quad (4.1)$$

де λ – коефіцієнт опору тертя, або коефіцієнт Дарсі, що залежить від режиму руху повітря.

Коефіцієнт опору тертя залежить від числа Рейнольдса:

$$Re = v \cdot d / \nu, \quad (4.2)$$

де $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря.

Фізичний зміст числа Рейнольдса: число Рейнольдса показує відношення сил інерції та в'язкості.

Біля поверхні стінок повітроводу в турбулентному потоку формується в'язкий підшар, режим руху в якому близький до ламінарного. Якщо в'язкий підшар вкриває виступи шорсткості стінки, то повітровід працює як гідравлічно гладкий. Коефіцієнт опору тертя λ залежить лише від Re . При збільшенні Re товщина в'язкого підшару зменшується і стає меншою за виступи шорсткості. Завихрення, утворені за виступами шорсткості, додатково відбирають енергію з потоку і збільшують опір. Повітровід працює у перехідній області. При зростанні числа Рейнольдса товщина в'язкого підшару стає значно меншою висоти виступів шорсткості. Число Re не впливає на зміну коефіцієнта λ . Тоді коефіцієнт опору тертя залежить лише від шорсткості, а втрати тиску стають пропорційними квадрату швидкості.

Повітровід працює у квадратичній області або області гідравлічно шорстких труб.

Шорсткість стінок залежить від матеріалу, з якого вони виготовлені, характеру механічного оброблення внутрішньої поверхні, наявності корозії, захисного покриття та відкладення осаду.

Дослідженнями встановлено, що середня висота виступів шорсткості стінок не повністю характеризує вплив шорсткості на опір. У зв'язку з цим вводиться поняття еквівалентної шорсткості k_e , мм, під якою розуміють таку висоту штучних рівномірно-зернистих виступів шорсткості, які створюють ефект опору, що дорівнює дійсному опору досліджуваного повітроводу. Орієнтовні значення $k_{e,0}$, мм: листова сталь або вініпласт – 0,1; азбоцемент або фанера – 0,2; шлакогіпс – 1,0; шлакобетон – 1,5; цегляна кладка – 4; штукатурка по сітці – 10.

Рівняння Колбрука-Уайта або Колбрука є загальноновизнаним у світі і найбільш точним на сьогодні виразом для коефіцієнта опору тертя при турбулентному русі:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} + 2 \lg \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k_e/d_e}{3,71} \right) = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} + \frac{2}{\ln 10} \ln \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k_e/d_e}{3,71} \right) = 0, \quad (4.3)$$

де d_e – еквівалентний діаметр повітроводу, м.

Основна проблема рівняння (4.3) – неможливість аналітичного розв'язання відносно λ . Але воно швидко (за одну-дві ітерації) розв'язується чисельно методом Ньютона.

На сьогодні не існує простих виразів, що описують коефіцієнт опору тертя з достатньою точністю. У пост-соціалістичних країнах країнах розповсюджена формула Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \cdot ((k_e/d_e) + (68/Re))^{0,25}. \quad (4.4)$$

Попри свою простоту формула (4.4) достатньо груба. Її відхилення досягає 8 % і більше, тому її більшість країн світу не визнає.

Для круглих повітроводів еквівалентний діаметр d_e дорівнює

діаметру d , м; для не круглих повітроводів площею перерізу A , м², та периметром Π , м:

$$d_e = 4 \cdot A / \Pi, \text{ м} \quad (4.5)$$

Для прямокутного перерізу розмірами $a \times b$, м,

$$d_e = 2 \cdot a \cdot b / (a + b), \text{ м.} \quad (4.6)$$

4.2. Опис лабораторної установки

Випробування прямої ділянки повітроводу проводяться на аеродинамічному стенді, зібраному за схемою «нагнітання» (Рис. 4.1).

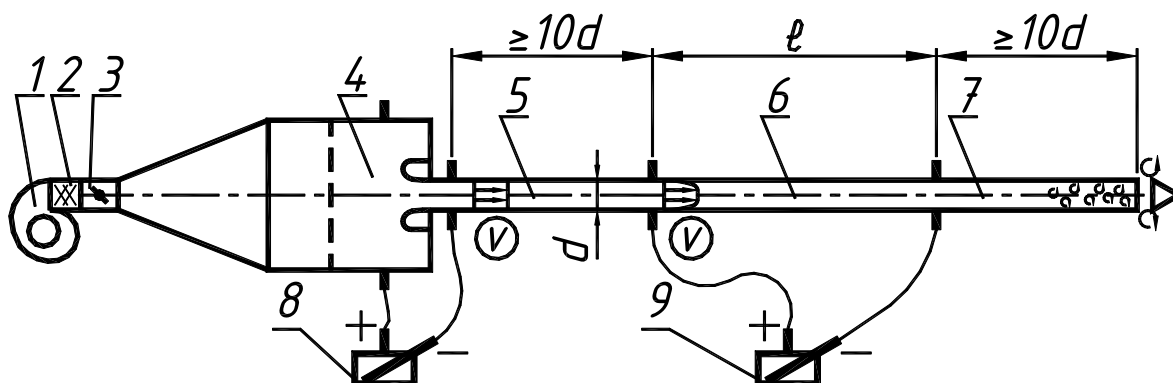


Рис. 4.1. Схема аеродинамічного стенда:

- 1 – вентилятор, 2 – гнучка вставка, 3 – дросель-клапан,
 4 – камера тиску, 5 – ділянка стабілізації, 6 – дослідна ділянка,
 7 – вихідна ділянка, 8 – мікроманометр для вимірювання витрати,
 9 – мікроманометр для вимірювання втрати тиску

При роботі стенда повітря подається вентилятором 1 через гнучку вставку 2 та дросель-клапан 3 у камеру тиску 4. Два призначення камери тиску: 1 – стабілізація потоку, 2 – вимірювання витрати повітря. У колекторі формується рівномірний профіль швидкості.

Далі повітря потрапляє до ділянки стабілізації 5. Призначення ділянки стабілізації – переформування профілю швидкості з рівномірного на характерний для розвиненого турбулентного потоку.

Далі повітря проходить дослідну ділянку 6 та вихідну ділянку 7. На виході повітря при формуванні струмини утворюються вихори, що можуть переміщуватися як в напрямку потоку, так і проти нього. **Призначення вихідної ділянки – усунення впливу вихорів на виході на роботу дослідної ділянки.**

Мікроманометр 8 призначений для вимірювання витрати повітря. Мікроманометр 9 вимірює втрати тиску на дослідній ділянці 6. Він може бути приєднаний до штуцерів або до стаціонарно встановлених двох однакових пневмометричних трубок повного або статичного тиску. Оскільки динамічний тиск є незмінним, то перепади статичного і повного тиску на дослідній ділянці однакові і дорівнюють втратам тиску.

4.3. Проведення вимірювань

Лінійкою вимірюється довжина дослідної ділянки ℓ , м, яка дорівнює відстані між штуцерами або пневмометричними трубками. Діаметр повітроводу d , м, та колектора камери тиску $d_{км}$, м, вимірюються нутроміром. Допускається використання лінійки.

Після запуску вентилятора виставляються різні витрати повітря дросель-клапаном 3 та беруться відліки за мікроманометрами 8 і 9. Результати заносяться до табл. 4.1.

4.4. Оброблення результатів вимірювань

Витрата повітря визначається за формулою (3.6) табл. 3.1, м³/с:

Швидкість повітря у стенді становить з формули (2.3), м/с:

$$v = L/(\pi \cdot d^2/4). \quad (4.7)$$

Примітка: для прямокутних повітроводів категорично заборонено використовувати у формулі (4.7) еквівалентний діаметр d_e .

Число Рейнольдса обчислюється за формулою (4.2); коефіцієнт опору тертя λ – з формули Дарсі (4.1):

$$\lambda = 2 \cdot \Delta P_{\ell} \cdot d / (\rho \cdot v^2 \cdot \ell). \quad (4.8)$$

Еквівалентна шорсткість k_e для кожного дослідів з рівняння Колбрука (4.3) становить

$$k_e = \left(3,71 e^{-\frac{1,1513}{\sqrt{\lambda}}} - \frac{9,3121}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} \right) \cdot d_e \quad (4.9)$$

Рахується середнє арифметичне значення k_e . Це значення порівнюється з загальновідомим для даного матеріалу стенду $k_{e,o}$. Розраховується нев'язка:

$$H = 100 |k_e - k_{e,o}| / k_{e,o}, \% \quad (4.10)$$

Якщо $H \leq 10\%$, то результати добре збігаються з загальновідомим значенням. Якщо $H > 10\%$, то необхідно вказати причини невідповідності. Головними з них є недостатнє значення Re , що призводить до області гідравлічно гладких труб ($k_e \approx 0$ або $k_e < 0$), а також негерметичність установки та неякісне з'єднання ділянок, що створює додатковий опір.

Лабораторна робота № 5
ОБТІКАННЯ БУДІВЛІ ПОВІТРЯНИМ ПОТОКОМ В
АЕРОДИНАМІЧНІЙ ТРУБІ

5.1. Теоретичні основи

При розрахунках природного повітрообміну в будівлях та розрахунках навантажень на їхні конструкції необхідно знати розподіл тиску вітру на зовнішніх поверхнях будівель.

При обдуванні будівель вітер створює на їхніх поверхнях додатні та від'ємні надлишкові статичні тиски. Не існує загальної теорії для опису розподілу тиску на поверхні довільної форми. Тому визначення розподілу тиску виконується експериментально.

У даній роботі розглядається обтікання вітром циліндра. З навітряного боку на ньому виникає додатний тиск. На бічних частинах потік відривається від стінок з утворенням розрідження, що поглиблюється у завітряний бік. Виникнення розрідження пояснюється тим, що предмет, який обтікає повітря, зменшує переріз для проходу останнього і, відповідно, збільшує швидкість його руху. Згідно з рівнянням Бернуллі збільшення швидкості потоку повітря веде до зниження його статичного тиску.

При набіганні вітру зі швидкістю v_0 , м/с, на поверхню будівлі частка динамічного тиску вітру P_0 , Па, переходить в i -й точці у надлишковий статичний тиск $\Delta P_{c,i}$, Па. Розподіл цього тиску описується безрозмірними аеродинамічними коефіцієнтами:

$$c_{e,i} = c_{f,i} = c_i = k_i = \Delta P_{c,i}/P_0 = \Delta P_{c,i}/(\rho v_0^2/2). \quad (5.1)$$

Визначення аеродинамічного коефіцієнта:

- це відношення статичного тиску на поверхні будівлі до динамічного тиску вітру;
- це безрозмірний надлишковий статичний тиск на поверхні будівлі, віднесений до динамічного тиску вітру;
- це частка кінетичної енергії (динамічного тиску) вітру, що перетворюється в потенціальну (статичний тиск) на поверхні будівлі.

Останнє визначення показує, що максимально можливе значення аеродинамічного коефіцієнта становить 1.

Значення аеродинамічних коефіцієнтів погано обтічних будівель з кутами залишаються практично незмінними при зміні швидкості потоку повітря і масштабу моделі. Тобто обтікання будівлі автотельне за критерієм Рейнольдса. А якщо будівля кутів не має (горизонтальний переріз круглий, еліптичний, овальний тощо), то точки відриву та аеродинамічні коефіцієнти залежать від числа Рейнольдса.

5.2. Опис лабораторної установки

Експериментальні дослідження розподілення величин повітряних тисків на зовнішніх огорожах будівель проводяться в аеродинамічній трубі, у даному випадку в камері Ейфеля (рис. 5.1, а,б).

Аеродинамічна труба (рис. 5.1, а) складається з камери 1, у передній частині якої встановлений колектор 2, приєднаний до сопла, з якого виходить потік повітря, що моделює вітровий потік.

Три призначення колектора:

- 1 – створення рівномірного профілю швидкості вітрового потоку;
- 2 – вимірювання динамічного тиску потоку повітря;
- 3 – відбір статичного тиску, який моделює атмосферний тиск навколо будівлі.

Для цього на соплі 3 встановлено усереднювальне кільце 4 та у камері 1 зроблено отвір 5, крізь який можливий відбір атмосферного тиску навколо труби.

На задній стінці камери 1 встановлено агрегат для видалення повітря з камери 1. Агрегат складається з дифузора 6, що починається розтрубом 7. У дифузори 6 встановлені сітка 8 і струминоспрямлювач 9, після якого знаходиться осьовий вентилятор 10 з електродвигуном. Вентилятор викидає повітря назовні крізь захисну решітку 11, що встановлена за вимогами техніки безпеки. Установка кільцевого розтруба 7 при вході в дифузор забезпечує руйнування вихрових кілець, що охоплюють вільну струмину в робочій частині.

Струминоспрямлювач – хонейкомб 9 (від англ. *Honey* – стільник)

– це система пластин, встановлених паралельно до напрямку потоку, що ділять переріз на малі частини (рис. 5.1, в).

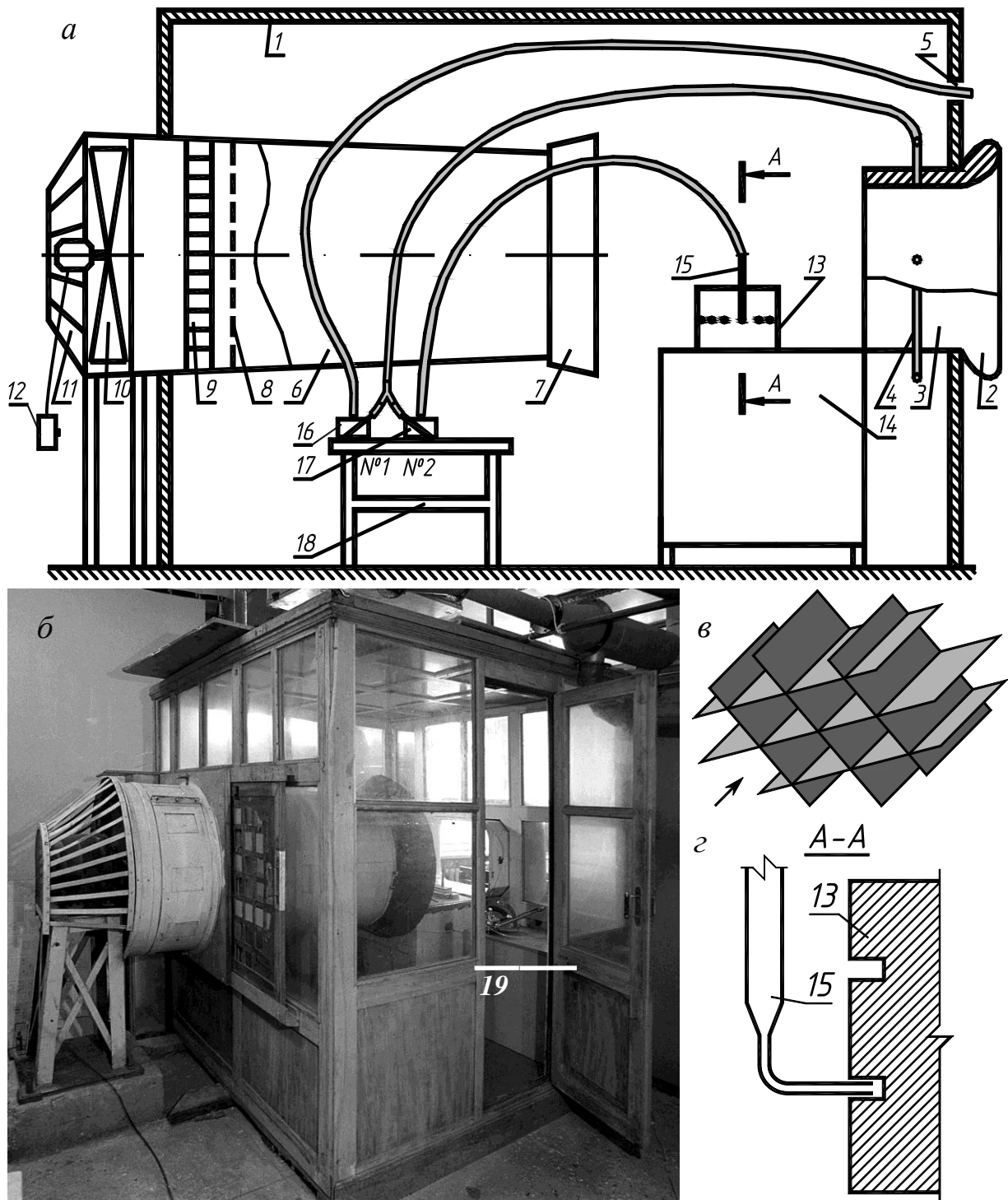


Рис. 5.1. Аеродинамічна труба:
а – схема, *б* – загальний вигляд,
в – струминоспрямлювач (хонейкомб), *г* – аеродинамічний щуп

Довжина ділянки стабілізації менша при менших перерізах. У

струминоспрямлювачі гасіння збурень потоку йде набагато швидше, ніж у вільному повітроводі. Крім того, пластини працюють як напрямні лопатки і зупиняють обертальний рух повітря, який утворюється у вентиляторі.

Сітка 8 не обов'язкова. Вона руйнує вихори, які прориваються крізь струминоспрямлювач у напрямку проти потоку.

Для регулювання швидкості повітря встановлено частотний регулятор обертів вентилятора 12. Це дозволяє зменшити енергоспоживання та шум при проміжних режимах.

Для вимірювання статичного тиску на поверхні моделі використовується аеродинамічний щуп 15 (рис. 5,1, а, з), занурений у заглиблення, що виконано на моделі 13. Вимірювання параметрів повітря виконується мікроманометром № 1, № 2 (поз. 16 і 17), які встановлені на столі 18. Цей стіл розташовується так, щоб не збурювати потік від сопла 3 до дифузора 6.

Мікроманометр № 2 приєднаний мінусом до усереднювального кільця 4, а плюсом – до аеродинамічного щупа 15. Він вимірює статичний тиск на поверхні моделі. Якщо мікроманометри № 2 (поз. 17) показує від'ємне значення, то змінюють місцями „+” і „-”, а тиск заносять зі знаком „-”.

При проведенні аеродинамічних дослідів міделевий переріз моделей не повинен перевищувати 10 % площі поперечного перерізу робочої частини аеродинамічної труби.

Вхід дослідників до робочої частини труби передбачений крізь герметизовані двері 19 у боковій стіні камери 1.

5.3. Заходи безпеки при роботі в аеродинамічній трубі

Забороняється намагатися відчиняти двері 19 під час роботи вентилятора. Розрідження в трубі може вирвати двері з рук, розбити скло та травмувати дослідників.

При роботі слід міцно тримати речі, тому що вентиляційний агрегат може їх засмоктати. Модель 13 має бути міцно закріплена на столі для запобігання засмоктування вентилятором.

Під час роботи аеродинамічної труби в аудиторії не дозволяється

знаходиться біля колектора. Крім небезпеки засмоктування особистих речей можливий вплив збурень потоку на роботу колектора.

5.4. Проведення вимірювань

Виконується вимірювання лінійкою розмірів моделей та побудова схеми моделі з нанесенням вимірювальних точок.

На столі 14 закріплюється модель. Для підвищення точності вимірювання виконуються одним мікроманометром.

Мікроманометр приєднується як № 1 (рис. 5.1, а). Вимірювання ним динамічного тиску виконуються після запуску вентиляторної установки викладачем. Результати заносяться до табл. 8 у перший рядок. Далі мікроманометр приєднують як № 2 (рис. 5.1, а). Аеродинамічний щуп послідовно встановлюють в експериментальні точки на моделі. При цьому експериментатор не повинен утворювати перешкод повітряним потокам. Якщо мікроманометр показує від'ємне значення, переставляються місцями шланги мікроманометра. У табл. 5.1 записуються номер точки, нанесений на моделі, показ мікроманометра та знак штуцера мікроманометра, до якого приєднано аеродинамічний щуп.

5.5. Оброблення результатів вимірювань

Динамічний тиск P_d , Па, визначають за формулою табл. 3.1 для колектора. Коефіцієнт колектора допускається приймати $K_k = 1$.

Будують у масштабі епюри аеродинамічних коефіцієнтів:

- на схемі моделі у перпендикулярному до стінок напрямку відкладають у певному масштабі значення аеродинамічних коефіцієнтів. Додатні коефіцієнти відкладаються у внутрішній бік, а від'ємні – назовні;
- одержані точки сполучають плавною кривою;
- виставляють номери точок та значення аеродинамічних коефіцієнтів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ТА РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про метрологію та метрологічну діяльність: Закон України від 05.06.2014 р. № 1314-VII. Відомості Верховної Ради. 2014. № 30. Із змінами 2015, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 і 2022 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18#Text>
2. Порядок проведення повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, та оформлення її результатів: затверджено наказом Міністерства економічного розвитку і торгівлі України від 08.02.2016 р. № 193. Із змінами 2016, 2019 і 2020 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0278-16#Text>
3. ДСТУ Б СЕН/TR 14788:2015 Вентиляція будівель. Проектування та визначення характеристик систем вентиляції житлових будинків (СЕН/TR 14788:2006, IDT). Чинні від 01.10.2016. Київ: Мінрегіон України, 2016. 113 с.
4. ДСТУ EN 12238:2013 Системи вентиляції та кондиціонування повітря. Пристрої входу-виходу повітря. Аеродинамічні випробування і визначання номінальних характеристик для використання у змішаному потоці (EN 12238:2001, IDT). Чинні від 01.07.2014. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. V. 26 с.
5. ДСТУ Б EN 15251:2011 Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики (EN 15251:2007, IDT). Чинні від 01.01.2013. Київ: Укрархбудінформ, 2013. 71 с.
6. ДСТУ EN 12599:2005. Системи вентиляції та кондиціонування повітря. Процедури випробування та методи вимірювання під час здавання в експлуатацію систем вентиляції та кондиціонування повітря (EN 12599:2000, IDT). Чинні від 01.07.2006. Київ: Держспоживстандарт України, 2006. IV.45 с.
7. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування. Чинні від 01.01.2014. Київ: Укрархбудінформ, 2014. V.135 с. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074971619479783152

8. ДСН 3.3.6.042-99. Державні санітарні норми параметрів мікроклімату у виробничих приміщеннях. - К.: МОЗ України, 2000.
9. Довгалюк В. Б. Аеродинаміка вентиляції: Навч. посібник. – Київ : Укртеліотех, 2015. – 366с.
10. Мілейковський В. О. Експериментальні аеродинамічні дослідження вентиляційних систем. – Київ.: Юстон, 2021. – 216 с.
11. Жуковський С. С. Аеродинаміка вентиляції: Навч. Посібник. – Львів : Вид-во нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2003. – 370с.
12. Корбут В. П., Мілейковський В. О., Дзюбенко В. Г., Саченко І. А. Використання взаємодії опуклих напівобмежених струмин при вентиляції зі змінною витратою повітря. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник, 2021. – Вип. 37. – С.7-12. URL: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2021.37.7-12>.
13. Корбут В. П., Мілейковський В. О. Повітророзподілення опуклими напівобмеженими струминами при вентиляції з постійною витратою повітря. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник, 2021. – Вип. 36. – С. 37-50. URL: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2021.36.37-50>.
14. Котелков Л. М., Тригуб О. С., Гузик Д. В., Приймак О. В., Єгорченков В. О. Апроксимація параметрів витікання повітря з отворів для моделювання природного повітрообміну. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник, 2021. – Вип. 38. – С.17-24. URL: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2021.38.17-24>.
15. Гузик Д. В., Мілейковський В. О., Череднікова О. В., Сопільник М. І., Приймак О. В. Лабораторні дослідження структури газодинамічних потоків. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник, 2021. – Вип. 38. – С.29–36. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2021.38.29-36>

Навчально-методичне видання

АЕРОДИНАМІКА ВЕНТИЛЯЦІЇ

Методичні вказівки

до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальності
192 «Будівництво та цивільна інженерія»
ОПП «Теплогазопостачання і вентиляція»

Укладачі: **МІЛЕЙКОВСЬКИЙ** Віктор Олександрович
ВАКУЛЕНКО Дар'я Ігорівна
ВАХУЛА Володимир Романович

Комп'ютерне верстання: *Д.І. Вакуленко*