

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра: "Матеріалознавство та ливарне виробництво"

**ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ
ТА ВЕНТИЛЯЦІЯ**

Методичні рекомендації

до лабораторних робіт
для студентів спеціальності
192 - Будівництво та цивільна інженерія
(для всіх форм навчання)

Кропивницький – 2020

Методичні рекомендації до лабораторних робіт з курсу “Теплогазопостачання та вентиляція” для студентів спеціальності 192 - Будівництво та цивільна інженерія (для всіх форм навчання) /Розроб. В.М. Ломакін, В.І. Кравченко. – Кропивницький: ЦНТУ, 2020. – 78 с.

Рецензент: Клименко В.В., д.т.н., професор

Автори: Ломакін В.М., к.т.н., доцент

Кравченко В.І., к.т.н., доцент

Відповідальний за випуск: Ломакін В.М.

Затверджено на засіданні
кафедри матеріалознавства та
ливарного виробництва ЦНТУ
Протокол № 1 від 19.08.2020 р.

© Теплогазопостачання та вентиляція
© В.М. Ломакін, В.І. Кравченко

ЗМІСТ

	стор.
Вказівки до виконання лабораторних робіт.....	4
Рекомендації до оформлення звіту.....	4
Лабораторна робота № 1. Термодинамічні параметри стану	5
Лабораторна робота №2. Дослідження політропного процесу	17
Лабораторна робота № 3. Витікання газу	23
Лабораторна робота № 4. Вивчення властивостей та термодинамічних процесів водяної пари	30
Лабораторна робота № 5. Дослідження процесу сушіння підігрітим повітрям	35
Лабораторна робота № 6. Визначення коефіцієнта теплопровідності твердих матеріалів	45
Лабораторна робота № 7. Тепловіддача циліндричної труби при природній конвекції	50
Лабораторна робота № 8. Випробування автономного кондиціонера	60
Список літератури	67

Вказівки до виконання лабораторних робіт

1. Студенти мають бути підготовлені до лабораторної роботи. Теоретична підготовка перевіряється за допомогою тестів.
2. Перед початком виконання лабораторних робіт отримати інструктаж з правил техніки безпеки і неухильно їх виконувати.
3. Не працювати на приладах, якщо не опанували досконально принцип їх роботи.
5. За пошкодження обладнання студенти несуть матеріальну відповідальність.
6. Після закінчення роботи студенти повинні прибрати своє робоче місце.

Рекомендації до оформлення звіту

1. Звіт з кожної роботи оформлюється в окремому зошиті у відповідності з установленою схемою для кожної лабораторної роботи: назва і мета роботи, табличні дані, графіки та висновки. Теоретичні відомості наводити коротко.
2. Оформлений звіт в кінці занять подається викладачеві для перевірки і підпису в разі позитивного тестування і виконання належного об'єму робіт.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПАРАМЕТРИ СТАНУ

1.1. Мета роботи

Вивчення методів вимірювання температури і тиску, будову і принцип роботи приладів для вимірювання тиску і температури, одиниці тиску і методу перерахунку раніш застосованих одиниць у міжнародну систему одиниць вимірювання (СИ). Експериментальне визначення термічних параметрів стану з урахуванням похибки приладів.

1.2. Загальні відомості

В термодинаміці розглядають, як правило, прості теплотехнічні системи, внутрішній стан яких однозначно визначається трьома інтенсивними параметрами: тиском $P_{\text{абс.}}$, абсолютною температурою T і питомим об'ємом v .

Абсолютний тиск $P_{\text{абс.}}$ є силою, яка діє по нормалі до поверхні тіла і віднесена до одиниці площі цієї поверхні.

$$p = P/f \quad (1.1)$$

Згідно молекулярно-кінетичної теорії тиск газу визначається рівнянням:

$$p = \frac{2}{3} n m c^2, \quad (1.2)$$

де n – число молекул в одиниці об'єму;

m – маса молекули;

c^2 – середня квадратична швидкість поступового руху молекул.

Відлік абсолютного тиску проводиться від абсолютного нуля або від абсолютного вакууму. Тиск рідини, яка знаходиться в спокої, має також назву статичного.

В практиці вимірюють такі тиски:

- а) атмосферний (барометричний), який вимірюється за допомогою барометрів;
- б) надлишковий (манометричний) тиск $P_{\text{над}}$, який являє собою тиск, що перевищує атмосферний і вимірюється за допомогою манометрів;
- в) розрідження, або вакуум $P_{\text{вак}}$, який являє собою тиск, недостатній до атмосферного, і вимірюється вакууметрами.

Всі манометри вимірюють надлишковий тиск $P_{\text{н}}$, який дорівнює різниці між абсолютним $P_{\text{абс.}}$ і барометричним тиском B .

$$P_{\text{н}} = P_{\text{абс.}}^{\text{н}} - B, \quad (1.3)$$

а абсолютний надлишковий тиск розраховується за формулою

$$P_{\text{абс.}}^{\text{н}} = B + P_{\text{над}} \quad (1.4)$$

Якщо абсолютний тиск менше барометричного ($P_{\text{абс.}} < B$), то вимірюється розрідження (вакуум) і прилад називається вакуумметром

$$P_{\text{вак.}} = B - P_{\text{абс.}}^B, \quad (1.5)$$

а абсолютний тиск вакууму розраховується за формулою

$$P_{\text{абс.}}^B = B - P_{\text{вак.}} \quad (1.6)$$

Згідно з Міжнародною системою вимірювань (СІ), тиск вимірюється в паскалях:

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ кг/(м/с}^2\text{)},$$

а також застосовуються інші одиниці тиску до введення системи СІ:

$$1 \text{ атм} = 1 \text{ кгс/см}^2; 1 \text{ мм.вод.ст.} = 9,81 \text{ Па}; 1 \text{ мм.рт.ст.} = 133 \text{ Па}$$

$$1 \text{ техн. атм.} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 10 \text{ м в.с} = 735,55 \text{ мм р.с.} = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па} = 0,0981 \text{ МПа} = 0,980665 \text{ бар};$$

$$1 \text{ фіз. атм.} = 1,033 \text{ кг/см}^2 = 760 \text{ мм рт. ст.} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па} = 0,1 \text{ МПа}$$

$$1 \text{ бар} = 0,1 \text{ МПа} = 100 \text{ кПа} = 100000 \text{ Па} = 750,06 \text{ мм р.с.} = 10,1972 \text{ м в.с.}$$

$$1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}; 1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$$

Для вимірювання тиску використовуються різні типи манометрів: рідинні U-подібні; вантажнопоршневі еталонні; деформаційні; манометри електроопору; п'єзокварцеві, тензометричні, місткісні.

Прилади, призначені для одночасного вимірювання надлишкового тиску і вакууму, називаються мановакуумметрами.

При точних вимірюваннях тиску враховуються приладові похибки манометрів і вводять коректуючі поправки.

Прилади для вимірювання тиску

- рідинний манометр

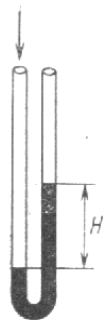


Рис. 1.1 – Рідинний манометр

- вантажнопоршневий манометри

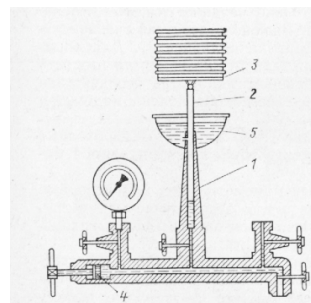


Рис. 1.2 – Вантажнопоршневий манометр

Найпростіший вантажнопоршневий манометр представлений на рисунку 1.2. Робочими частинами манометра є циліндр 1 і поршень 2 з тарілкою 3, на яку можна покласти вантаж. Поршень чітко прилягає до циліндра, так що зазор між ними складає 1-2 мкм. Під поршень манометра залито масло. Площа поршня дорівнює 1 см^2 , тому кожний кілограм вантажу, покладеного на тарілку манометра, створює тиск масла 1 кгс/см^2 . Для подачі масла служить гвинтовий прес 4. Вимірювання тиску проводиться під час обертання поршня і тарілки з вантажем; при цьому невелика кількість масла витікає через зазор між поршнем і циліндром в чашку 5, забезпечуючи надійне змащування поверхонь, що труться.

- деформаційні манометри

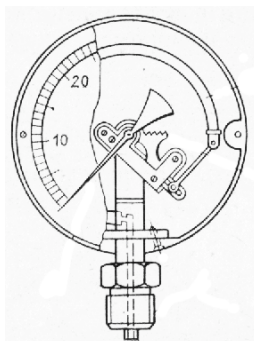


Рис. 1.3 – манометр з трубчатою пружиною

Найбільше розповсюдження одержали манометри прямої дії, в яких переміщення чутливого елемента визиває переміщення стрілки пристрою. В якості прикладу на рис. 1.3 наведена принципова схема манометра прямої дії.

Манометри електроопору – для вимірювання дуже великих тисків – 200 МПА. Залежність зміни опору проволочки від тиску.

П'єзокварцеві – для вимірювання швидкозмінюючого тиску. Явище виникнення електричного заряду при стисненні кварцу.

Тензометричний – наклеюється на трубу.

Ємнісні – прогин мембрани, яка є однією з обкладинок конденсатора, призводить до зміни ємності.

Скляні рідинні манометри.

Факт встановлення термічної рівноваги (перший закон термодинаміки) доводить існування нового параметра стану – **абсолютної температури T** .

Тепловий стан робочого тіла характеризується температурою. Для ідеального газу згідно молекулярно – кінетичної теорії

$$T = 2/3 K \cdot mc^2/2, \quad (1.7)$$

де T – абсолютна температура, K – константа Больцмана;

$mc^2/2$ – середня кінетична енергія поступального руху молекул.

Практично кінетичну енергію виміряти неможливо, тому для вимірювання температури застосовують прилади, дія яких заснована на використанні термометричних властивостей газів, рідин, та твердих тіл.

Для вимірювання температури використовують різні методи: про зміну температури судять по зміні будь-яких властивостей термометричної речовини. Приладом, за допомогою якого створена Міжнародна практична температурна шкала (МПТШ – 68), є газовий термометр постійного об'єму. Теоретичною передумовою, що дозволяє використовувати газовий термометр, є наявність функціональної залежності між тиском ідеального газу в посудині з постійним об'ємом ($V_o = \text{const}$) і абсолютною температурою T :

$$P/P_o = T/T_o. \quad (1.8)$$

Цей закон виведено на підставі молекулярно-кінетичної теорії питомого газу ($P_o > 0$) і тому дозволяє практично реалізувати створення абсолютної температурної шкали, існування якої визначається другим законом термодинаміки. Одиницею температури затверджений Кельвін (K), який дорівнює

1/273,16 частини термодинамічної температури потрійної точки води. Отже, потрійній точці води відповідає значення 273,16 К. Другою реперною (базою) точкою є точка абсолютного нуля температури. (Ці реперні точки – основа МПТШ – 68). Допускається застосовувати температуру Цельсія (стоградусна шкала, що має дві реперні точки: температуру плавлення льоду і кипіння води при тиску 1 атм = 760 мм рт.ст.), що визначається за виразом:

$$t = T - 273,16^{\circ}\text{C} \quad (1.9)$$

Температура Цельсія t , таким чином, є температурною різницею відносно фіксованої температури $T_0 = 273,16 \text{ K}$, тому $1^{\circ}\text{C} = 1\text{K}$.

Отже, температура ідеального газового термометра не залежить від властивостей газу як термометричної речовини і тому дозволяє відтворити абсолютну температурну шкалу.

Незважаючи на принципову простоту газового термометра, його виготовлення і використання є надзвичайно складним. З цієї причини газовий термометр служить первинним еталоном для порівняння і уточнення МПТШ. Своєрідними «охоронцями» цієї шкали є постійні температури фазової рівноваги між двома або трьома фазами чистої речовини – реперні точки (табл.1.1).

Замість основних реперних точок в МПТШ-68 зафіксовано і 30 вторинних базових точок, що дозволяють фіксувати температурний інтервал від 13,81 до 6300 К.

В практиці теплотехнічних вимірювань застосовують такі прилади:

- скляні рідинні термометри;
- термоелектричні термометри (термопари);
- термометри опору;
- фотоелектричні пірометри;

Будь-який термометр фіксує свою власну температуру і тому, при зміні температури необхідно забезпечити термічну рівновагу між термометром і досліджуваною системою (газом, рідиною, твердим тілом), тобто усунути або врахувати похибки приладів.

Таблиця 1.1 – Основні реперні точки МПТШ – 68

Рівноважний стан	T, K	$t, ^{\circ}\text{C}$
Потрійна точка урівноваженого водню	13,81	-259,34
Точка кипіння урівноваженого водню при тиску 33,380 кПа(259 мм рт.ст.)	17,042	-256,108
Точка кипіння урівноваженого водню	20,28	-252,87
Точка кипіння урівноваженого неону	27,102	-246,048
Потрійна точка кисню	54,361	-218,789
Точка кипіння кисню	90,188	-182,962
Потрійна точка води	273,16	0,01
Точка кипіння води	373,15	100
Точка затвердіння цинку	692,73	419,58
Точка затвердіння срібла	1235,08	961,93
Точка затвердіння золота	1337,58	1064,43

Прилади для вимірювання температури

Термометри розширення. Принцип дії скляних рідинних термометрів заснований на різниці теплового розширення термометричної рідини і скляної оболонки термометра, в якій вона знаходиться. Такі термометри застосовуються для вимірювання температур в інтервалі від -200 до $+750^{\circ}\text{C}$. Хоча для заповнення рідинних термометрів використовуються різноманітні рідини, але найбільше поширення одержали очищені ртуть і спирт.

Серед ртутних термометрів, що випускає промисловість, в лабораторіях можуть знайти застосування термометри для точних вимірювань і так звані лабораторні термометри.

Термометри для точних вимірювань випускають для вимірювання температур в інтервалі від 0 до 500°C ; ціна поділок і похибок вимірювань коливаються для різних термометрів від $0,01$ до $0,1^{\circ}\text{C}$:

от 0 до 60°C	$0,01^{\circ}\text{C}$
от 55 до 155°C	$0,02^{\circ}\text{C}$
от 140 до 300°C	$0,05^{\circ}\text{C}$
от 300 до 500°C	$0,1^{\circ}\text{C}$

Лабораторні термометри змінюють температуру від -30 до $+600^{\circ}\text{C}$ з похибкою від $0,2$ до 6°C :

Термоелектричні термометри. Термоелектричні термометри (термопари) одержали виключно широке поширення як в лабораторній практиці, так і в промисловості.

Термопара представляє собою два різнорідних провідника (проволоки різного матеріалу), що складають загальний електричний ланцюг (рисунок 1.4). Якщо температури місць сполучення (спаювання) провідників T і T_0 неоднакові, то виникає термо-ЕРС і по ланцюгу протікає струм. Термо-ЕРС тим більше, чим більша різниця температур спаювання. При цьому температура в проміжних точках провідників не чинить впливу на значення ЕРС, якщо провідники однорідні. По термо-ЕРС роблять висновки про температуру спаювання.

Основне правило роботи з термопарами полягає в наступному: якщо в ланцюг термопари включається який-небудь третій однорідний провідник, кінці якого мають однакову температуру, це не впливає на виникаючу термо-ЕРС. Останнє дає можливість включати в ланцюг термопар пристрій, що вимірює термо-ЕРС.

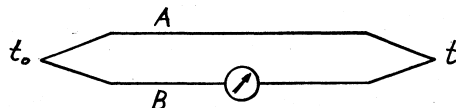


Рис. 1.4 – Термоелектричний ланцюг,
що складається із двох різнорідних провідників

Електродами термопари служить проволока діаметром $0,1-3,2$ мм.

В лабораторній практиці знайшли застосування такі термопари:

Платинородій-платинова термопара. Матеріалом одного електрода цієї термопари є сплав платини (90%) і родія (10%), другої – чиста платина. Така термопара є робочим еталоном, що відтворює одиницю температури – кельвін – в

інтервалі від 630,74 до 1064,43°C. Платинородій-платинова термопара використовується для вимірювання температури в інтервалі від 0 до 1300°C, а короткочасно – до 1600°C.

Платинородієва термопара. Матеріал одного електрода цієї термопари – платинородій – сплав зі вмістом 30% родія, а матеріал другого електрода – платинородій – з вмістом 6% родія. Такі термопари застосовуються для вимірювання температур від 300 до 1600°C (короткочасно – до 1800°C).

Вольфрам-ренієва термопара. Електроди цієї термопари виготовлені зі сплаву вольфраму і ренію.

Хромель-алюмелева (ТХА) і хромель-копелева (ТХК) термопари застосовують для вимірювань температури в інтервалі від 100 до 1300 °C.

На практиці термоЕРС термопари вимірюється прямим методом за допомогою мілівольтметра або компенсаційним методом (порівняння) за допомогою потенціометра.

Термометр опору. Самий точний в інтервалі 13,81 до 903,89К. Ефект збільшення опору платинової проволочки з підвищенням температури.

Фотоелектричний пірометр. Для вимірювання високих температур зазвичай приймають пірометри. Принцип дії пірометрів заснований на формулі Планка – залежності спектральної густини енергії випромінювання чорного тіла від температури і довжини хвилі.

В якості третього параметра стану виступає питомий об'єм:

Питомий об'єм v – це відношення об'єму V до маси m :

$$v = V/m, \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (1.10)$$

який отримуємо шляхом розподілу об'єму системи V на її масу m . На відміну від екстенсивних величин V і m , питомий об'єм v (м³/кг) однаковий для будь-якої частини урівноваженої гомогенної системи.

Величина, зворотна питомому об'єму, тобто відношення маси до об'єму, називається густиною:

$$\rho = m/V, \text{ кг/м}^3 \quad (1.11)$$

Відповідно $\rho \cdot v = 1$.

Відомо, що для питомого газу (граничний стан при $P_o > 0$) справедливе рівняння стану, що має вигляд :

$$p \cdot V = m \cdot R_\mu \cdot T / \mu, \quad (1.12)$$

де p – абсолютний тиск, Па;

V – об'єм, зайнятий газом, м³;

m – маса газу, кг;

T – термодинамічна температура газу, К;

R_μ – універсальна газова стала для кілограм-моль будь-якого газу і дорівнює 8314,3±1,1 Дж/(кмоль·К);

μ – молярна маса газу, кг/моль.

При переході до питомих параметрів, згідно рівняння (1.10), співвідношення (1.12) перетвориться у рівняння Клапейрона:

$$p \cdot v = R \cdot T \quad (1.13)$$

де $R = (R_\mu/\mu)$ – газова стала, Дж/(кг·К).

1.3. Лабораторна установка

Лабораторна установка (рис. 1.5) складається з вентилятора 2, привід якого здійснюється від електродвигуна 1. На всмоктуючому боці повітропровода встановлені витратомір 5 і дросельна заслінка 3, на нагнітаючому боці – повітропровід 9. Розрідження і надлишковий тиск вимірюється манометрами 4 і 10.

Порядок проведення роботи

1. Увімкнути електродвигун 1, дочекатись, поки вентилятор 2 буде обертатись із сталим числом обертів.
2. За допомогою заслінки 3 встановити необхідне розрідження і записати показання манометрів 4 і 10. За допомогою барометра виміряти атмосферний тиск.
3. Увімкнути електродвигун 1.
4. Перевести в систему СІ показання вимірених величин.
5. Обчислити абсолютний тиск. Результати вимірювань і розрахунків внести в протокол випробувань.

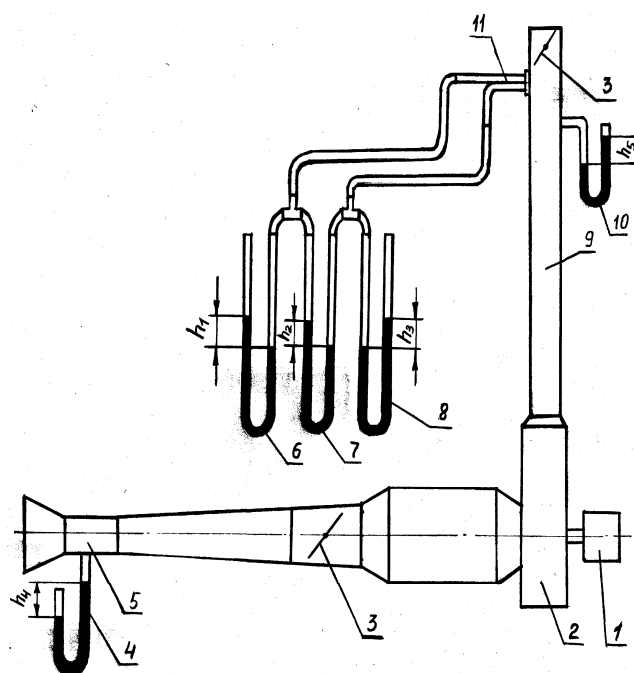


Рис. 1.5. Принципова схема лабораторної установки для вимірювання тиску

Протокол випробувань

Параметр	Ат.	мм рт. ст	мм вод.ст	Па	Кпа	МПа	Бар
Атмосферний тиск, В							
Надлишковий тиск, $P_{\text{над}}$							
Розрідження, $P_{\text{вак}}$							
Абсолютний тиск, $P_{\text{абс.}}^{\text{н}}$							
Абсолютний тиск, $P_{\text{абс.}}^{\text{в}}$							

1.4 Контрольні запитання

1. Які параметри стану Ви знаєте?
2. Тиск: одиниці вимірювання, принцип дії манометра.
3. Температура: одиниці вимірювання, принцип дії термopари.
4. Міжнародна практична температурна шкала (МПТШ-68)
5. Види термометрів, принцип їх дії і забезпечення мінімальних похибок вимірювання.
6. Визначення питомого об'єму газу і рідини, одиниці вимірювання.
7. Рівняння стану ідеального газу.

Практична частина ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ГАЗУ

1.5. Мета роботи

Показати, як використовуються параметри стану на прикладі вимірювання витрати газоподібного середовища швидкісним методом.

1.6. Загальні відомості

Під терміном «витрата газу» розуміють витрачену в масових або об'ємних одиницях кількість газу, який протікає через даний поперечний переріз трубопроводу площею f , м^2 зі швидкістю c , м/с .

Формули для розрахунку:

об'ємної витрати, $\text{м}^3/\text{с}$

$$V = fc, \quad (1.14)$$

масової витрати, кг/с

$$M = \rho fc, \quad (1.15)$$

де ρ – густина газу в даній площині перерізу, кг/м^3 .

Для визначення витрати рідини або газу застосовують дросельний або швидкісний методи вимірювання.

Дросельний метод заснований на законі дроселювання і передбачає установку на прямій ділянці трубопроводу дросельного пристрою (діафрагми, сопло Вентурі), який утворює звуження перерізу. У звужуючому пристрої швидкість потоку збільшується, внаслідок чого згідно закону Бернуллі відбувається падіння тиску. З різниці тисків перед звужуючим пристроєм і за ним судять про витрату речовини.

Дросельний метод вимірювання витрати середовищ застосовують у тих випадках, коли за умовами виробництва потрібен безперервний контроль витрати.

При випробуваннях вентиляційних систем, проведенні досліджень в лабораторних умовах і т.п. застосування знаходить швидкісний метод вимірювання витрати, заснований на визначенні середньої швидкості потоку в даному перерізі трубопроводу.

Середню швидкість потоку можна визначити різними приладами: пневматичними або напірними трубками, анемометрами та ін.

В даній лабораторній роботі використовується методика вимірювання швидкості газу за допомогою пневмометричної трубки.

Газовий потік у трубопроводі характеризується статичним тиском $P_{\text{ст}}$, швидкісним (динамічним) $P_{\text{ск}}$ і повним P_n тисками, зв'язок між якими встановлюється рівнянням Бернуллі:

$$P_n = P_{\text{ст}} + P_{\text{шв}} \quad (1.16)$$

Швидкісний тиск (напір) визначається за формулою, Па:

$$P_{\text{шв}} = \rho c^2 / 2, \quad (1.17)$$

звідки швидкість потоку, м/с:

$$c = \sqrt{2P_{\text{шв}} / \rho}, \quad (1.18)$$

Таким чином, визначення швидкості потоку зводиться до вимірювання швидкісного тиску. З рівняння (1.16) маємо:

$$P_{\text{шв}} = P_{\text{п}} - P_{\text{ст}}$$

Повний тиск можна виміряти за допомогою відкритої трубки Піто 1, поставленої назустріч потоку, а статичний – за допомогою трубки 2, вставленої в отвір трубопроводу перпендикулярно до потоку (рис. 1.6).

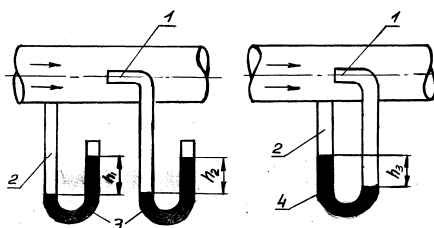


Рис. 1.6 – Схема вимірювання тисків у трубопроводі:
1 – трубка повного тиску; 2 – трубка статичного тиску;
3 – манометр; 4 – диференційний манометр

Якщо обидві трубки приєднати до протилежних кінців дифманометра, то різниця рівнів робочої рідини в ньому покаже значення швидкісного тиску.

В даній роботі для вимірювання швидкісного тиску використовується подвійна пневмометрична трубка МІОП (рис. 1.7).

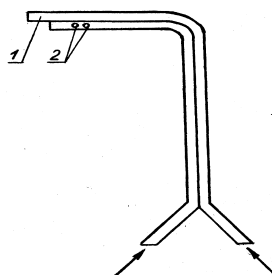


Рис. 1.7 – Подвійна пневмометрична трубка МІОП

Приймачем повного тиску в ній є осьовий отвір 1, а приймачем статичного тиску – ряд радіальних отворів 2. Подвійна пневмометрична трубка дозволяє одразу вимірювати швидкісний тиск у будь-якій точці поперечного перерізу потоку. Якщо від'єднати від дифманометра приймач повного тиску, то можна виміряти статичний тиск у трубопроводі. Розміщуючи пневмометричну трубку в різних точках поперечного перерізу трубопроводу, можна знайти розподіл швидкостей в ньому. Швидкість потоку і швидкісний тиск, як наслідок, в різних точках поперечного перерізу різні. Тому для обчислення середньої швидкості потоку треба знати середній динамічний тиск в данному перерізі, який визначається як середня квадратична величина, Па:

$$P_{\text{шв}} = \left[\left(\sqrt{P_{\text{шв}_1}} + \sqrt{P_{\text{шв}_2}} + \dots + \sqrt{P_{\text{шв}_n}} \right) / n \right]^2, \quad (1.19)$$

де $P_{\text{шв}_1}, \dots, P_{\text{шв}_n}$ – значення динамічного тиску, що виміряні у різних точках перерізу трубопроводу;

n – кількість вимірювань.

При визначенні швидкості потоку повітря за формулою (1.18) необхідно знати густину повітря ρ , яка для приблизних розрахунків може бути прийнята $1,2 \text{ кг/м}^3$.

Для точних вимірювань витрати газу його густина повинна визначатися в залежності від параметрів газу в перерізі, де вимірюється витрата. Для цього використовується рівняння Менделєєва-Клапейрона, згідно з яким:

$$\rho = p / RT, \quad (1.20)$$

де R – газова стала, Дж/(кгК);

p – абсолютний статичний тиск газу, який визначається за формулою (1.4), Па;

T – абсолютна температура газу, К.

Порядок проведення роботи

В даній роботі витрата повітря вимірюється на вентиляційній установці (рис. 1.5).

На трубопроводі 9, розташованому на боці нагнітання є отвір, призначений для встановлення подвійної пневмометричної трубки 11 для вимірювання повного, швидкісного і статичного тисків манометрами 6, 7, 8

Порядок виконання роботи

1. Перевірити підключення манометрів до напорної трубки.
2. Увімкнути вентилятор.
3. За допомогою заслінки 3 встановити задану витрату повітря.
4. При номенальному числі обертів виміряти статичний і динамічний тиск.
5. Вимкнути вентилятор.
6. За барометром виміряти атмосферний тиск, а за термометром – температуру зовнішнього повітря. Виміряти внутрішній діаметр трубопроводу.

Результати вимірювань і розрахунків занести у протокол випробувань.

Для визначення точок вимірів площа поперечного перерізу трубопроводу розбивається на два рівновеликих за площею кільця.

При вимірюванні витрати пневмометричними трубками слід дотримуватись таких правил:

1. Трубка встановлюється в такій площі перерізу трубопроводу, де повітряний потік усталений. Для цього слід дотримуватись вимоги, щоб до наконечника трубки і після нього були прямі ділянки довжиною не менш, як $4d$.
2. Трубка встановлюється наконечником назустріч потоку і паралельно йому. Відхилення від стінок трубопроводу не повинно перевищувати 7° .

Протокол випробувань і розрахунків

Параметр	Номер формули	Одиниця вимір.	Позначення	Результат
Діаметр трубопроводу	-	М	d	
Площа поперечного перерізу	-	м ²	f	
Барометричний тиск	-	мм рт. ст., Па	B	
Швидкісний тиск	-	мм вод. ст.	$P_{шв1}$	
	-	мм вод. ст.	$P_{шв2}$	
	-	мм вод. ст.	$P_{шв3}$	
Статичний тиск	-	мм вод. ст.	$P_{ст}$	
Температура атмосф. повітря	-	°С	t	
Середній швидкісний тиск	2.6	мм вод. ст. Па	$P_{шв}$	
Абсолютний статичний тиск	1.4	Па	P	
Абсолютна температура	1.8	К	T	
Густина повітря	1.10	кг/м ³	ρ	
Середня швидкість повітряного потоку	2.5	м/с	c	
Витрата повітря				
об'ємна	2.1	м ³ /с	V	
масова	2.2	кг/с	M	

1.7. Контрольні запитання

1. Що таке витрата газу?
2. Які види тисків виникають у потоці газу і який зв'язок існує між ними?
3. В чому полягає суть швидкісного методу вимірювання витрати газу?
4. Що таке швидкісний тиск?
5. Як визначається витрата газу? Які величини необхідно для цього знати?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛІТРОПНОГО ПРОЦЕСУ

Мета роботи: визначити експериментально показник політропи і розрахувати теплоємність, роботу, кількість теплоти, зміну внутрішньої енергії, ентальпії і ентропії, проаналізувати одержані результати.

2.1. Загальні відомості

Політропними називають будь-які довільні термодинамічні процеси, які здійснюються при сталій теплоємності.

Рівняння політропного процесу, записане через P і V параметри, має вигляд:

$$PV^n = \text{const}, \quad (2.1)$$

де n – показник політропи, який може приймати значення від $-\infty$ до $+\infty$, але для даного процесу він є величина стала.

Значення показника політропи у будь-якому процесі можна знайти, якщо прологарифмувати рівняння співвідношення параметрів:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(n-1)}{n}}, \quad (2.2)$$

тобто

$$n = \frac{\ln \frac{P_2}{P_1}}{\ln \frac{V_1}{V_2}}. \quad (2.3)$$

Величина n також може бути визначена, якщо побудувати політропний процес у логарифмічних координатах (Рис. 2.1.)

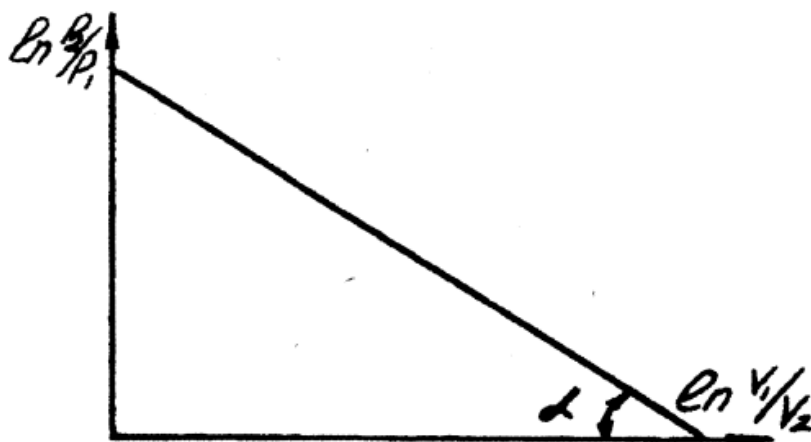


Рис. 2.1. Зображення політропного процесу у логарифмічних координатах

Процес зображується прямою лінією, тангенс кута нахилу якого чисельно дорівнює показнику n .

Кількість тепла, яке підводиться до системи або відводиться від неї при політропному процесі, розраховується за рівнянням, кДж/кг

$$g = C_n(t_2 - t_1), \quad (2.4)$$

де C_n - теплоємність політропного процесу, кДж/(кг°K).

Для конкретного політропного процесу теплоємність можна вичислити:

$$C_n = C_v \frac{n-k}{n-1}, \quad (2.5)$$

де C_v - ізохорна теплоємність, кДж/(кг°K); k - показник адіабати, який залежить від роду газу.

В разі приблизних розрахунків при не дуже високих температурах можна вважати, що мольні теплоємності і є сталі величини для ідеальних газів і залежать тільки від атомності газу. Для перерахунку мольних теплоємностей в інші використовуються формули:

$$C_p = \frac{\mu C_p}{\mu}; \quad C_v = \frac{\mu C_v}{\mu}; \quad C'_p = \frac{\mu C_p}{22.4}; \quad C'_v = \frac{\mu C_v}{22.4}, \quad (2.6.)$$

де μ - молекулярна маса газу, кг/кмоль.

Значення мольних теплоємностей і показників адіабати для різних газів наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1.

Мольні теплоємності різних ідеальних газів, кДж/(кмоль°K) і відповідні показники адіабати

Газ	μC_v	μC_p	k
✓ Одноатомний	12.5	20.8	1.67
Двохатомний	20.8	29.1	1.40
Трьох- і багатоатомний	29.1	37.4	1.20

Теплоємності C_p і C_v пов'язані між собою рівнянням Майєра:

$$C_p - C_v = R \quad [\text{Дж}/(\text{кг К})];$$

$$\mu C_p - \mu C_v = 8.314 \quad [\text{кДж}/(\text{кмоль К})];$$

$$\frac{C_p}{C_v} = k, \quad (2.7)$$

При точних розрахунках треба враховувати залежність теплоємкості від температури. У цьому випадку обчислюють середню теплоємкість в інтервалі температур $t_1 \dots t_2$ табличним методом за формулами

$$C_{x_{t_1}}^{t_2} = \frac{C_{x_0}^{t_2} t_2 - C_{x_0}^{t_1} t_1}{t_2 - t_1}; \quad C_{x_{t_1}}'^{t_2} = \frac{C_{x_0}'^{t_2} t_2 - C_{x_0}'^{t_1} t_1}{t_2 - t_1};$$

$$\mu C_{x_{t_1}}^{t_2} = \frac{\mu C_{x_0}^{t_2} t_2 - \mu C_{x_0}^{t_1} t_1}{t_2 - t_1}, \quad (2.8)$$

де $- C_{x_0}^{t_2}$, $C_{x_0}^{t_1}$ і т.д. - табличні значення теплоємкостей, що визначаються за температурами t_1 і t_2 . Індекс x вказує на рід процесу, в якому визначається теплоємкість.

Значення мольних ізобарних теплоємкостей газів приведені у додатку 1.

Робота розширення, а також зміна внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії розраховується за слідуючими формулами:

$$l_{\text{роз}} = \frac{1}{n-1} (P_1 V_1 - P_2 V_2) = \frac{RT_1}{n-1} \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) = \frac{RT_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]; \quad (2.9)$$

$$\Delta u = C_v (T_2 - T_1) \quad (2.10)$$

$$\Delta h = C_p (T_2 - T_1) \quad (2.11)$$

$$\Delta s = C_n \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (2.12)$$

2.2. Будова лабораторної установки

Принципова схема установки для дослідження політропних процесів стиснення і розширення показана на Рис. 2.2.

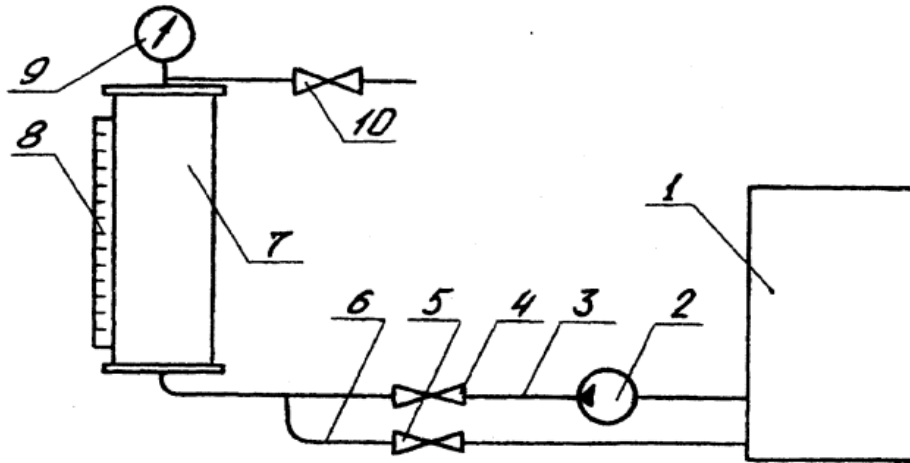


Рис. 2.2 Схема лабораторної установки для вивчення політропного процесу.

Стиснення повітря у скляному товстостінному циліндрі 7 здійснюється за допомогою води, яка подається насосом 2 по напірному трубопроводу 3. Швидкість подачі води регулюється вентилем 4, а спуск проводиться по зливному трубопроводу 6. Тиск повітря в циліндрі контролюється манометром 9, а об'єм - за допомогою мірної лінійки 8, відградуваної у кубічних сантиметрах. Початковий рівень води в циліндрі регулюється при атмосферному тиску, для чого необхідно відкрити вентиль 10. Швидкість стиснення (розширення), а отже, і показник процесу n залежить від витрати води, що подається в циліндр, тобто від степеня відкриття вентилів 4.

2.3. Порядок проведення роботи

1. Відкрити вентиль 10; вентилі 4 і 5 повинні бути закритими.
2. Установити рівень води у циліндрі в нижньому положенні, для чого треба злити надлишки води через зливний трубопровід 6 і вентиль 5. При регулюванні рівня не можна допускати, щоб вода повністю витікала з циліндру, тому що для нормальної роботи відцентрового насоса необхідно, щоб він був заповнений водою.
3. Записати початковий об'єм V_1 при атмосферному тиску.
4. Закрити вентиль 10 і включити насос.
5. Регулюючи витрати води за допомогою вентилів 4, стиснути повітря до об'єму V_2 і зафіксувати по манометру тиск P_2 в момент, коли

вентиль 4 повністю закритий . Закривати вентиль треба швидко.

6.Повторити досліди 2 - 3 рази, підвищуючи тиск у кожному досліді на 0.5-0.8 ат. В останньому досліді тиск не повинен перевищувати 2.0 ат . В кожному досліді необхідно записати нові значення тиску P і об'єму V , тому що у проміжок часу між дослідом тиск і об'єм зменшуються . Це пояснюється тим , що при стисненні повітря його температура в циліндрі підвищується а потім відбувається охолодження, оскільки теплота відводиться до навколишнього середовища і води.

7. Виключити насос і провести 1 – 2 дослідів процесу розширення. Для цього частина води з циліндру за допомогою вентиля 5 вилити у бак.

8. Результати вимірювань записати в протокол випробувань . Розрахунки проводити без врахування залежності теплоємності від температури.

2.4. Протокол випробувань і розрахунків

Параметр	Позначення	Одиниця вимір.	Дослід			
			Стиснення		Розширення	
1	2	3	4	5	6	7

Атмосферний тиск B мм рт ст
 B Па

Температура навколишнього середовища t °C

Об'єм:
початковий V_1 м³

кінцевий V_2 м³

Надлишковий тиск:
початковий $P_{1над}$ ат

кінцевий $P_{2над}$ ат

Абсолютний тиск:
початковий P_1 Па

кінцевий P_2 Па

Показник політропи n

Маса газу m кг

Кінцева температура T_2 °K

Робота стиснення (розширення) l Дж/кг

Теплоємність політропного процесу C_n Дж/(кг°K)

1	2	3	4	5	6	7
Теплота	q	Дж/кг				
Зміна внутрішньої енергії	Δu	Дж/кг				
Зміна ентальпії	Δh	Дж/кг				
Зміна ентропії	Δs	Дж/(кг°К)				
Перевірка по 1 закону термодинаміки	$q = \Delta u + l$					

Після розрахунків і оформлення протоколу випробувань відповісти на наступні запитання :

1. Які з одержаних процесів близькі до ізотермічного і адіабатного; зобразити політропи з визначеними показниками n в PV – і TS діаграмах.
2. Як впливає показник політропи на величину роботи, на зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії ?
3. Чи задовольняють одержані результати 1 закону термодинаміки ?

Контрольні запитання

1. Що називається політропним процесом ?
2. Покажіть, що основні термодинамічні процеси є окремими випадками політропних процесів.
3. Як визначається показник політропи ?
4. Що таке теплоємність і від чого вона залежить ?
5. Які існують види питомої теплоємності, одиниці їхнього вимірювання ?
6. Які існують співвідношення між ізобарною та ізохорною теплоємностями ?
7. Поясніть фізичний зміст нескінченно великої теплоємності ізотермного процесу, а також від'ємної теплоємності політропного процесу.
8. Лінія якого процесу - ізохорного чи ізобарного - буде більш крутою в TS діаграмі і чому?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

ВИТІКАННЯ ГАЗУ

Мета роботи: одержати експериментальну залежність швидкості і секундної витрати повітря від відношення тисків на вході і виході при витіканні з звужуючого сопла ; визначити коефіцієнти швидкості і витрати для звужуючого сопла.

3.1. Загальні відомості

Витіканням називається прискорений рух газу через відносно короткі канали особливої форми – сопла, в яких здійснюється падіння тиску. В звужуючих і комбінованих соплах здійснюється перетворення потенційної енергії стиснутого газу в кінетичну.

Процес витікання з сопел можна вважати адіабатним, через те, що сопла являють собою відносно короткі канали і витікання короткочасне. Зв'язок між профілем сопла і максимальною швидкістю витікання встановлюється рівнянням Маха:

$$\frac{df}{f} = \frac{dc}{c} \left(\frac{c^2}{a^2} - 1 \right), \quad (3.1)$$

де f – площа поперечного перерізу сопла; c – швидкість витікання;
 a – місцева швидкість звука.

Отже, швидкості витікання $c \leq a$ можуть бути одержані у звужуючих соплах, надзвукові $c > a$ – у комбінованих (соплах Лавалю).

Теоретична швидкість витікання газу у гирлі сопла, м/с:

$$c_{2T} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (3.2)$$

а масова витрата

$$M_T = f_2 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_1}{v_1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (3.3)$$

де P_1, P_2 – абсолютний тиск газу відповідно на вході і виході з сопла, Па; v_1 – питомий об'єм газу на вході в сопло, м³/кг; k – показник адіабати; f_2 – площа вихідного перерізу сопла, м².

Аналіз цих формул показує, що швидкість витікання і масова витрата залежить від відношення тисків $P_2/P_1 = \beta$ (Рис. 3.1.)

Оскільки $P_1 \geq P_2$, відношення змінюється від 0 до 1. Залежності швидкості витікання c_{2T} і масової витрати M_T від відношення β , які побудовані згідно рівнянням (3.2.) і (3.3.), зображуються кривими $1k$ і $1k'$. Згідно графікам при зменшенні β (припустимо, якщо $P_1 = \text{const}$, $P_2 \rightarrow 0$) масова витрата спочатку збільшується (крива $1k'$) від нульового при $\beta = 1$ до деякого максимуму, а потім зменшується (крива $k'0$), а швидкість весь час збільшується. Експериментальні дані витікання з сопел показують, що витрата після досягнення максимуму при подальшому зменшенні β залишається незмінною і має максимальне значення (крива $1k'b$). Така суперечність між теорією і експериментальними даними пояснюється наступним. Якщо зменшити тиск P_2 на виході з сопла (P_1 залишається сталим), тобто зменшити відношення β , повинен здійснитись перерозподіл тиску вздовж сопла, яке протікає із швидкістю, що дорівнює місцевій швидкості звука a . Поки швидкість витікання c_{2T} буде менша швидкості звука (крива $1k$), перерозподіл тиску здійснюється з відносною швидкістю, яка дорівнює різниці $a - c_{2T}$, а тиск у гирлі сопла дорівнює тиску навколишнього середовища P_2 . При зменшенні величини β ця різниця буде зменшуватись і при максимальній витраті буде дорівнювати нулю, а швидкість витікання $c_{2T} = a$. Цьому моменту відповідає відношення $\beta_{кр}$, яке називається критичним, а у гирлі сопла встановлюється тиск $P_{2кр}$ більший, ніж тиск P_2 навколишнього середовища. При подальшому зниженні тиску $P_2 \rightarrow 0$ хвиля перерозподілу тиску не зможе розповсюджуватись вздовж сопла, через те що її швидкість $a = c_{2T}$, отже, відносна швидкість $a - c_{2T}$ буде дорівнювати нулю.

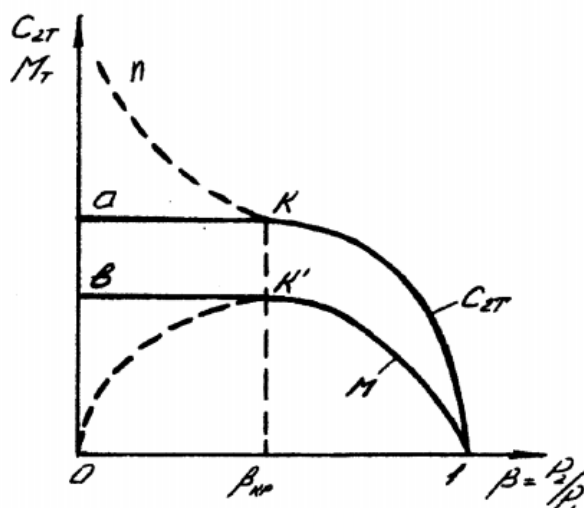


Рис 3.1. Залежність швидкості і витрати при витіканні від перепаду тисків

Якщо дослідити рівняння (3.2) на максимум, можна встановити, що:

$$\beta_{кр} = \frac{P_{2кр}}{P_1} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (3.4)$$

Як видно з рівняння, критичне відношення $\beta_{кр}$ не залежить від параметрів газу, а залежить тільки від його роду. Якщо прийняти для двохатомних газів $k = 1.4$, $\beta_{кр} = 0.528$; якщо для багатоатомних і перегрітої пари $k = 1.29$, то $\beta_{кр} = 0.546$.

Якщо підставити у рівняння (3.2) і (3.3) $\beta = \beta_{кр}$ з рівняння (3.4), одержимо критичну швидкість, м/с:

$$C_{2T} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_1}, \quad (3.5)$$

і максимальну витрату газу, кг/с:

$$M_T = f_2 \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{P_1}{V_1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}}. \quad (3.6)$$

Таким чином, крива $1ka$ (рис.3.1) характеризує залежність швидкості витікання від β для звужуючих сопел, $1kn$ – для комбінованих; крива $1k'b$ – залежність масової витрати від β для обох типів сопел.

Для реальних газів дійсна швидкість витікання і масова витрата завжди менші від теоретичних, що пояснюється появою необоротних втрат на тертя.

Відношення дійсної масової витрати до теоретичної називається коефіцієнтом витрати:

$$\varphi = \frac{M_{kg}}{M_T}. \quad (3.7)$$

Відношення дійсної швидкості витікання до теоретичної називається коефіцієнтом швидкості:

$$\mu = \frac{C_{2g}}{C_{2T}}. \quad (3.8)$$

3.2 Будова лабораторної установки

Процес витікання із звужуючого сопла досліджують на лабораторній установці (рис. 3.2).

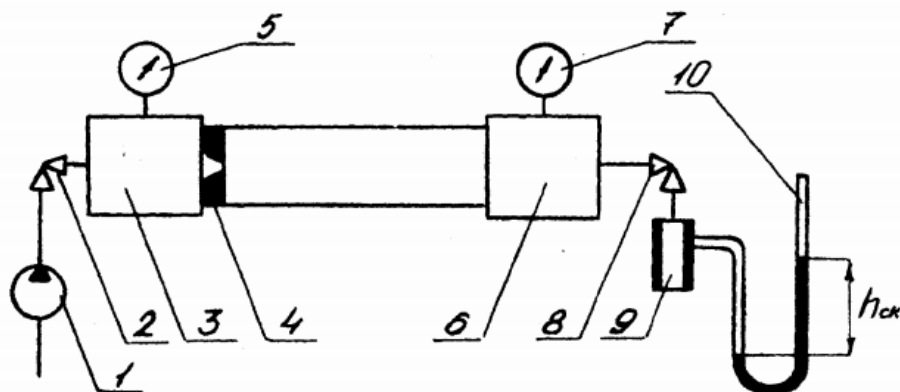


Рис. 3.2. Принципова схема установки для дослідження процесу витікання

Компресор 1 подає повітря у передсоплову камеру 3. Через звужуюче сопло 4 повітря витікає у камеру 6. Витрата і тиск повітря на вході і виході з сопла регулюється відповідно вентилями 2 і 8. Тиск повітря вимірюється манометрами 5 і 7, які підключені до передсоплової 3 і післясоплової 6 камерам.

Для вимірювання дійсної витрати повітря встановлено вимірювальний пристрій 9, який виконаний у вигляді циліндру діаметром 3.5 мм, до якого підключений рідинний манометр 10, за допомогою якого вимірюється швидкісний напір повітря. Звужуюче сопло, що встановлено між камерами 3 і 6, має на виході діаметр $d_2 = 1$ мм.

3.3 Порядок проведення роботи

1. Відкрити вентиль 2, а вентиль 8 повністю закрити.
2. Ознайомитись з розташуванням приладів і системами відліку.
3. Включити компресор і вентилем 8 установити мінімальну витрату.
4. Записати показання манометрів, барометра, термометра у протокол випробувань.
5. Повторити досліди 5–6 разів, регулюючи витрату повітря вентилем 8.
6. Після закінчення дослідів виключити компресор.

3.4 Порядок розрахунку

1. Виміряні величини перевести в одиниці СІ.
2. Оскільки температури повітря на вході і виході з сопла не змінюються, можна визначити їх розрахунковим методом, вимірюючи температуру навколишнього середовища $T_{навк}$ і атмосферний тиск B . Вважаємо стиснення у компресорі політропним з показником $n = 1.03...1.05$.
3. Розрахунки необхідно виконувати у послідовності, яка викладена в протоколі випробувань і розрахунків. Один з дослідів необхідно розрахувати вручну, а потім на мікрокалькуляторі.
4. За результатами розрахунків побудувати графіки.

$$C_{2T} = f_1(\beta); \quad M_T = f_2(\beta); \quad C_{2g} = f_3(\beta); \quad M_g = f_4(\beta)$$

Протокол випробувань і розрахунків

Параметр	Позначення	Одиниця вимір.	Розрах. Формула	Дослід						
				1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Діаметр вихідно-

го перерізу сопла

d_2

м

$1 \cdot 10^{-3}$

Площа попереч-

ного перерізу

f_2

м²

$$\frac{\pi d_2^2}{4}$$

Діаметр витра-

томірного при-

строю

d_3

м

$3.5 \cdot 10^{-3}$

Площа попе-

речного пере-

різу

f_3

м²

$$\frac{\pi d_3^2}{4}$$

Атмосферний

тиск

B

мм рт. ст.

Па

Надлишковий

тиск:

на вході в сопло

$P_{1над}$

кгс/см²

Па

на виході з сопла

$P_{2над}$

кгс/см²

Па

Швидкісний напір

$P_{шв}$

мм вод. ст

Па

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----

Температура зовнішнього повітря

$T_{навк}$

°К

Абсолютний тиск:

на вході в сопло

P_1

Па

(1.4)

на виході з сопла

P_2

Па

(1.4)

Відношення тисків

β

Температура

повітря :

на вході в сопло

T_1

Па

(2.2)

на виході з сопла

T_2

Па

(2.2)

Теоретична швидкість витікання

C_{2T}

м/с

(3.2)

Густина повітря

за соплом

ρ_2

кг/м³

(1.16)

Теоретична масова витрата

M_T

кг/с

$\rho_2 f_2 C_{2T}$

Густина повітря

у витратомір-

ному пристрої

ρ_3

кг/м³

(1.16)

Швидкість повіт-

ря у витратомір-

ному пристрої

C_3

м/с

(1.12)

Дійсна масова

витрата

M_g

кг/с

$\rho_3 f_3 C_3$

Дійсна швидкість

витікання

C_{2g}

м/с

$M_g / (\rho_2 f_2)$

Максимальна

швидкість виті-

кання

$C_{2кр}$

м/с

(3.5)

Максимальна

витрата повітря

M_{max}

кг/с

(3.6)

Коефіцієнт:

витрати

φ

(3.7)

швидкості

μ

(3.8)

Контрольні запитання

1. Що таке витікання газу і де воно застосовується ?
2. Від чого залежать швидкість витікання і масова витрата ?
3. Особливості витікання із звужуючих сопел.
4. В яких соплах можна одержати надзвукові швидкості ?
5. Що таке критичне відношення тисків і від чого воно залежить ?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

ВИВЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВОДЯНОЇ ПАРИ

Мета роботи: вивчити властивості водяної пари, методи визначення її параметрів, навчитися користуватися таблицями та діаграмами водяної пари для розрахунку термодинамічних процесів.

4.1. Загальні відомості

Пара є реальний газ, який не підлягає закономірностям ідеального газу, і тому розрахунки процесів, що здійснюються з водяною парою, зручно проводити за допомогою таблиць і діаграм.

Розглядаємо пароутворення у вільному просторі, тому процес ізобарний, тобто $P = \text{const}$.

Процес одержання пари складається з слідуєчих етапів: нагрівання води до температури кипіння, пароутворення (кипіння) при температурі насичення і перегріву.

При кипінні утворюється волога пара, що являє собою суміш сухої насиченої пари з найдрібнішими краплями води. Волога пара характеризується ступенем сухості X - відношенням маси сухої насиченої пари $m_{c.n.}$ до маси вологої пари $m_{в.п.}$

$$X = \frac{m_{c.n.}}{m_{в.п.}} \quad (4.1)$$

Ступінь сухості змінюється від 0 (початок кипіння) до 1 (суха насичена пара).

В процесі кипіння при $P = \text{const}$ температура киплячої рідини і пари, що утворюється, рівні і залишаються незмінними, тобто процес кипіння є ізобарно-ізотермічним. Температура, при якій здійснюється процес кипіння, називається температурою насичення t_n . Чим вище тиск, тим більше температура насичення t_n . Теплота, що витрачається на перетворення 1 кг води, нагрітої до температури насичення t_n , в суху насичену пару при сталому тиску (і сталій температурі) називається питомою теплотою пароутворення, r Дж / кг.

При підведенні теплоти до сухої насиченої пари температура її збільшується і стає вищою за температуру насичення t_n . Така пара називається перегрітою, а її температура – температурою перегріву пари $t_{n.n.}$

Термодинамічні властивості води і водяної пари характеризуються параметрами: тиском, температурою насичення, питомим об'ємом, ентальпією, ентропією.

Загальноприйняті слідуєчі умовні позначення: для води у початковий момент кипіння – індекс штрих (v', h', s'), для сухої насиченої

пари – два штриха (v'', h'', s''), вологої пари – індекс x (v_x, h_x, s_x).

Термодинамічні властивості води і водяної пари приводяться в спеціальних таблицях (додаток 2-4) і дозволяють виконувати всі необхідні розрахунки, пов'язані із застосуванням водяної пари.

Формули для розрахунку параметрів води і водяної пари наведені у табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Формули для розрахунку параметрів води і водяної пари

Величина	Вода	П а р а		
		волога	суха	перегріта

Ентальпія:

$$\begin{array}{llll} \text{кДж/кг} & h' = C_{ppio} t_n & h_x = h' + hr = (1-x)h' + x'' & h'' = h' + r \quad h_{nn} = h'' + C_{pn} t_{nn} \end{array}$$

Питомий об'єм,

$$\begin{array}{llll} \text{м}^3/\text{кг} & v' & v_x = v''x + (1-x)v' & v'' \quad v_{nn} \end{array}$$

Ентропія,

$$\begin{array}{llll} \text{кДж/(кг К)} & s' \cong C_{pv} \ln \frac{T_n}{273} & c_x = s' + \frac{rx}{T_n} & s'' = s' + \frac{r}{T_n} + C_{pn} \ln \frac{T_{nn}}{T_n} \end{array}$$

Діаграма hs , в якій теплота, ентальпія і ентропія вимірюються лінійними відрізками, застосовується для розрахунку термодинамічних процесів водяної пари. На осі абсцис діаграми (рис. 4.1) відкладені значення питомої ентропії s , а по осі ординат – питомої ентальпії h . На діаграмі нанесені нижня ($x = 0$) і верхня ($x = 1$) пограничні криві.

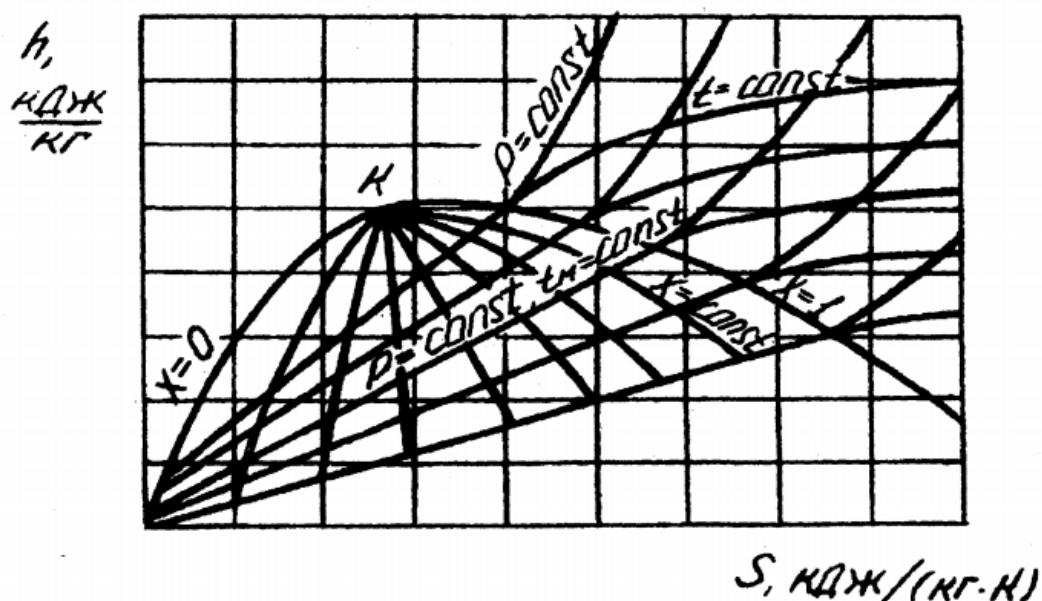


Рис. 4.1. Загальний вид hs – діаграми водяної пари

Між пограничними кривими знаходяться ділянки вологої пари, вище верхньої пограничної кривої – ділянка перегрітої пари. На ділянці вологої пари, починаючи від нижньої пограничної кривої $x = 0$, проходить лінія $P = \text{const}$, а з критичної точки K – пучок кривих $x = \text{const}$. Через те, що температура кипіння залежить тільки від тиску, на ділянці вологої пари ізотерми співпадають з ізобарами. На ділянці перегрітої пари, починаючи від верхньої пограничної кривої ($x = 1$), ізобари піднімаються угору логарифмічними кривими, а ізотерми направлені вправо. На діаграмі нанесені також штрихпунктирними лініями ізохори $v = \text{const}$. Побудова термодинамічних процесів здійснюється по лініях: ізохорний – за ізохорою $v = \text{const}$, ізобарний – $P = \text{const}$, ізотермічний – $t = \text{const}$, адіабатний – $s = \text{const}$, ізоентальпійний – $h = \text{const}$. Для побудови процесу необхідно знати два початкових і один кінцевий параметр. Точки початку і кінця процесу знаходяться на перетинанні відповідних кривих (наприклад, ізобари P та ізотерми t – початок процесу; ізобара і ступінь сухості x – для кінця процесу).

Розрахункові співвідношення для обчислення зовнішньої роботи, кількості теплоти і зміни внутрішньої енергії в термодинамічних процесах водяної пари приведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Розрахункові співвідношення для обчислення роботи, теплоти і зміни внутрішньої енергії

Процес	Зміна внутрішньої енергії	Кількість	
		роботи	теплоти
Ізохорний	$\Delta u_v = h_2 - h_1 - v(P_2 - P_1)$	$l_v = 0$	$q_v = \Delta u$
Ізобарний	$\Delta u_p = h_2 - h_1 - p(v_2 - v_1)$	$l_p = q - \Delta u_p$	$q_p = \Delta h$
Ізотермічний	$\Delta u_T = (h_2 - P_2 v_2) - (h_1 - P_1 v_1)$	$l_T = q - \Delta u_1$	$q_T = T(s_2 - s_1)$
Адіабатний	$\Delta u_s = (h_2 - P_2 v_2) - (h_1 - P_1 v_1)$	$l_s = -\Delta u$	$q_s = 0$

Приклад 1. Користуючись таблицями та hs – діаграмою водяної пари, знайти питомий об'єм, ентальпію, внутрішню енергію і ентропію вологої пари при $P_{\text{абс}} = 0.5$ МПа і вологістю 15 %.

Розв'язання. Вологістю називають величину $-(1 - x)$ і тому ступінь сухості $x = 85$ %. Із таблиць водяної пари (додаток 2): $t_n = 151.8$ °С; $v' = 0.0010927$ м³/кг; $v'' = 0.3748$ м³/кг; $h' = 640.1$ кДж/кг; $h'' = 2748.5$ кДж/кг; $r = 2108.4$ кДж/кг; $s' = 1.8605$ кДж/(кг°К); $s'' = 6.8221$ кДж/(кг°К).

Використовуючи формули табл. 4.1, знаходимо для вологої пари

питомий об'єм:

$$v_x = v''x + (1-x)v' = 0.3748 \cdot 0.85 + 0.001097 \cdot 0.15 = 0.3187 \text{ м}^3/\text{кг};$$

ентальпія: $h_x = h' + xr = 640.1 + 0.85 \cdot 2108.4 = 2432.24 \text{ кДж/кг}$; ентродія:

$$s_x = s' + \frac{xr}{T_H} = 1.8605 + \frac{2108.4 \cdot 0.85}{273 + 151.8} = 6.0795 \text{ кДж/(кг}^\circ\text{К)};$$

внутрішня енергія:

$$u_x = h_x - Pv_x = 2432.24 - 0.5 \cdot 10^6 \cdot 0.3187 \cdot 10^{-3} = 2273 \text{ кДж/кг}.$$

4.2. Розв'язання за допомогою hs – діаграми

На діаграмі знайти т. А на перетині ізобари $P = 0.5 \text{ МПа}$ і лінії сталої ступіні сухості $x = 0.85$ (рис.4.2, а), для якої визначити vx , hx , s_x і t_H , а потім обчислити u_x .

Приклад 2. В початковому стані перегріта пара має тиск $P_1 = 7 \text{ МПа}$ і температуру $t_1 = 400^\circ\text{С}$. Які будуть вологість і температура цієї пари в кінці оборотного адіабатного розширення, якщо кінцевий тиск $P_2 = 0.3 \text{ МПа}$? Визначити також різницю ентальпій.

Розв'язання. Задача розв'язується за допомогою hs – діаграми. Будеться процес адіабатного розширення 1 – 2 по лінії $s = \text{const}$ (рис.4.2, б). Для цього необхідно знайти на діаграмі точку 1 на перетині ізобари $P_1 = 7 \text{ МПа}$ і ізотерми $t = 400^\circ\text{С}$ та провести через нею адіабату до перетину з ізобарою $P_2 = 0.3 \text{ МПа}$. Для точок 1 і 2 знайти h_1 , h_2 , x_2 , t_H . При визначенні t_H необхідно знайти точку перетину ізобари P_2 з верхньою граничною кривою $x = 1$ і з'ясувати, яка ізотерма виходить із точки перетинання.

$$h_1 = 3160 \text{ кДж/кг}; h_2 = 2515 \text{ кДж/кг}; x_2 = 0.902; t_H = 135^\circ\text{С};$$

$$\Delta h = h_1 - h_2 = 3160 - 2515 = 645 \text{ кДж/кг}.$$

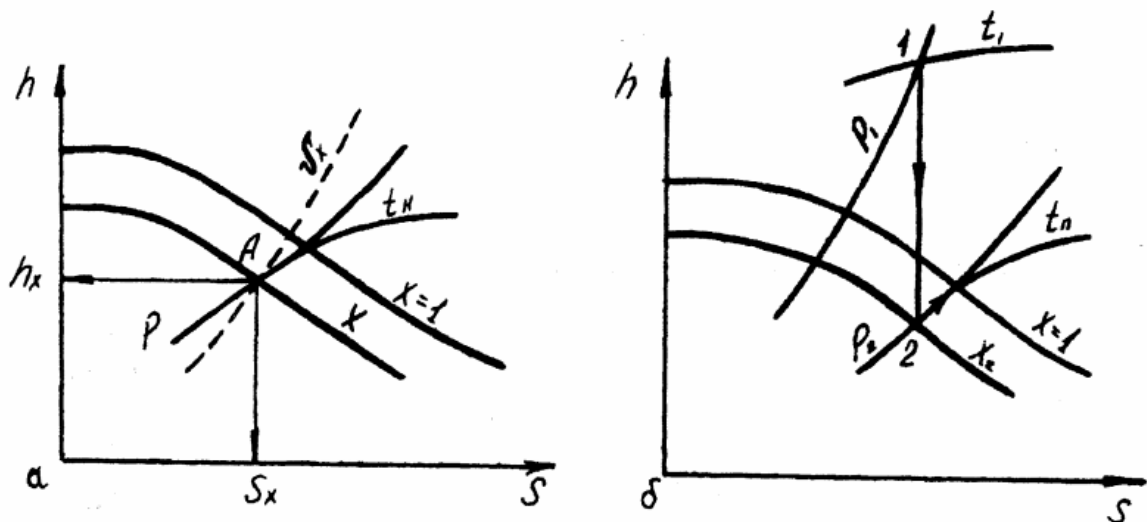


Рис. 4.2 Застосування hs – діаграми: а – до прикладу 1; б – до прикладу 2.

Контрольні питання та завдання

1. Що називається пароутворенням, випаровуванням, кипінням, конденсацією?
2. Опишіть процес одержання перегрітої пари і проілюструйте його за допомогою PV – діаграми водяної пари.
3. Яку пару називають вологою насиченою, сухою насиченою та перегрітою?
4. Що таке критична точка?
5. Що таке теплота пароутворення, конденсації? Їхні визначення.
6. Що таке ступінь сухості? Як визначаються питомий об'єм, ентальпія і внутрішня енергія вологої пари?
7. Як зображаються основні термодинамічні процеси водяної пари на PV і TS – діаграмах?
8. В чому особливість розрахунку ізотермного процесу водяної пари у порівнянні з ідеальним газом?
9. Зобразіть цикл Ренкіна в PV – і TS – діаграмах і опишіть схему паросилової установки, в якій він здійснюється.
10. Як визначити термічний ККД і питому витрату пари в циклі Ренкіна?

[1, с. 162–173; 2, с. 36 – 42; с. 33 – 41, 68 – 72]

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ПІДГРІТИМ ПОВІТРЯМ

Мета роботи: вивчити властивості вологого повітря; дослідити теоретичний і дійсний процеси сушіння підігрітим повітрям.

5.1. Загальні відомості

Вологим повітрям називається суміш сухого повітря з водяною парою. В техніці здебільшого використовується повітря, тиск якого близький до атмосферного. Водяна пара знаходиться в ньому під невеликим парціальним тиском і у перегрітому стані, тобто її температура перевищує температуру насичення. Сухе повітря теж є перегріта пара, тому що при атмосферному тиску температура його кипіння становить близько 80 °К. Тому при розрахунках процесів з вологим повітрям з достатньою точністю можуть бути використані рівняння ідеального газу.

Згідно закону Дальтона загальний тиск вологого повітря $P_{\text{вв}}$ є сума парціальних тисків сухого повітря $P_{\text{сн}}$ і водяної пари $P_{\text{вп}}$:

$$P_{\text{вв}} = P_{\text{сн}} + P_{\text{вп}}. \quad (5.1)$$

В залежності від температури і маси водяної пари у повітрі пара може знаходитися в насиченому або перегрітому стані. Якщо при сталій температурі збільшувати масу водяної пари у повітрі, її парціальний тиск буде збільшуватись. Після досягнення тиску насичення P_n пара стане сухою насиченою (рис. 5.1, процес 1 – 2).

Суміш сухого повітря з насиченою водяною парою називається насиченим вологим повітрям.

При подальшому збільшенні маси водяної пари буде спостерігатись часткова конденсація вологи.

Стан насичення можна одержати також у тому випадку, якщо при сталій масі водяної пари охолоджувати повітря при сталому парціальному тиску (рис. 5.1, процес 1 – 3). У точці 3 пара стає насиченою і при подальшому охолодженні утворюється туман. Температура, до якої слід охолодити дане вологе повітря, щоб воно стало насиченим, називається температурою точки роси t_p .

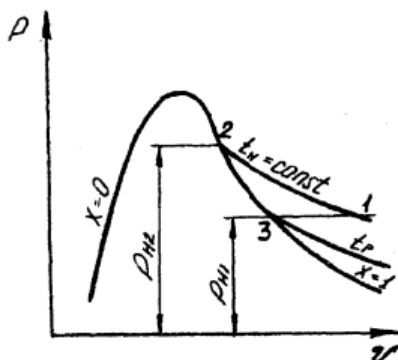


Рис. 5.1. Процеси водяної пари у вологому повітрі

Суміш сухого повітря з перегрітою парою називається ненасиченим вологим повітрям. Стан перегрітої пари на PV – діаграмі (рис. 5.1) характеризується точкою 1.

Кількість вологи у повітрі характеризується абсолютною ρ_n і відносною φ вологістю, а також вологовмістом d .

Абсолютною вологістю називається маса водяної пари, яка приходить на 1 м^3 вологого повітря, тобто це є густина водяної пари в об'ємі вологого повітря:

$$\frac{m_n}{V_{\text{вв}}} = \frac{m_n}{V_n} = \rho_n \text{ кг/м}^3, \quad (5.2)$$

де m_n – маса водяної пари; $V_{\text{вв}}$ – об'єм вологого повітря, м^3 .

Процентне відношення фактичної абсолютної вологості ρ_n до максимально можливої при насиченості ρ_n при тій самій температурі називається відносною вологістю:

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_n}. \quad (5.3)$$

Значення φ може змінюватись від 0 (сухе повітря) до 100 % (вологе повітря).

З достатньою точністю відносну вологість можна визначити за формулою:

$$\varphi = \frac{P_n}{P_n} \cdot 100\%, \quad (5.4)$$

де P_n, P_n – парціальні тиски водяної пари і насиченої водяної пари у вологому повітрі при даній температурі t_n .

При збільшенні температури абсолютна і відносна вологості зменшуються. Парціальний тиск насиченої пари P_n визначають за допомогою таблиць насиченої пари по температурі $t_n = t_{\text{в.в.}}$. Дійсний парціальний тиск водяної пари знаходять з таблиць за температурою точки роси.

Вологовмістом повітря називається маса водяної пари, яка припадає на 1 кг сухого повітря; кг пари / кг сухого повітря:

$$d = \frac{m_{\text{вн}}}{m_{\text{сн}}} = 0.622 \frac{P_n}{(B - P_n)}. \quad (5.5)$$

Вологовміст не залежить від температури.

Густина вологого повітря:

$$\rho_{\text{вн}} = \rho_{\text{сн}} + \rho_{\text{вн}} = \rho_{\text{сн}} (1 + d) = \rho_{\text{вн}} \frac{1 + d}{d}, \quad (5.6)$$

де $\rho_{\text{сн}}, \rho_{\text{вн}}$ – густина відповідно сухого повітря і водяної пари.

Сушіння будь-якого тіла полягає у випаровуванні вологи, яка міститься в ньому. Часто сушіння здійснюється гарячим повітрям.

Процес зміни стану вологого повітря у сушильній установці

складається з двох етапів. Спочатку атмосферне повітря, яке має початкову відносну вологість ϕ_1 і температуру t_1 , надходить у калорифер, де його температура підвищується до t_2 , а відносна вологість зменшується до ϕ_2 . Потім гаряче повітря направляється в сушильну камеру, де воно віддає частину свого тепла матеріалу, що сушиться. Температура повітря при цьому зменшується, а температура матеріалу – збільшується. Волога з матеріалу випаровується і відноситься повітрям.

Отже, відносна вологість повітря, а також його вологовміст будуть збільшуватись.

Визначення параметрів і дослідження процесів вологого повітря значно спрощується, якщо використовувати hd – діаграму вологого повітря (рис.5.2).

Стан вологого повітря на діаграмі можна визначити, якщо відомі будь-які два параметри (ϕ і t , P_n і t і т.д.). На діаграмі відкладені по осі абсцис вологовміст d , г/кг сухого повітря, а по осі ординат ентальпія сухого повітря h , кДж/кг сухого повітря. Для зручності вісь абсцис направлена під кутом 135° до осі ординат. Тому лінії $h = \text{const}$ нахилені під кутом 45° до горизонту. Відлік ентальпії слід обирати по нахиленим лініям (направлення відліку зображено константою h). На діаграмі показано: ізоТЕРМИ сухого t_c і мокрого термометра t_m (штрих-пунктирні лінії), криві сталої відносної вологості $\phi = \text{const}$. Найнижча крива $\phi = 100\%$. При $\phi = 100\%$ температури сухого і мокрого термометрів рівні, тому на цій кривій вони сходяться в одній точці.

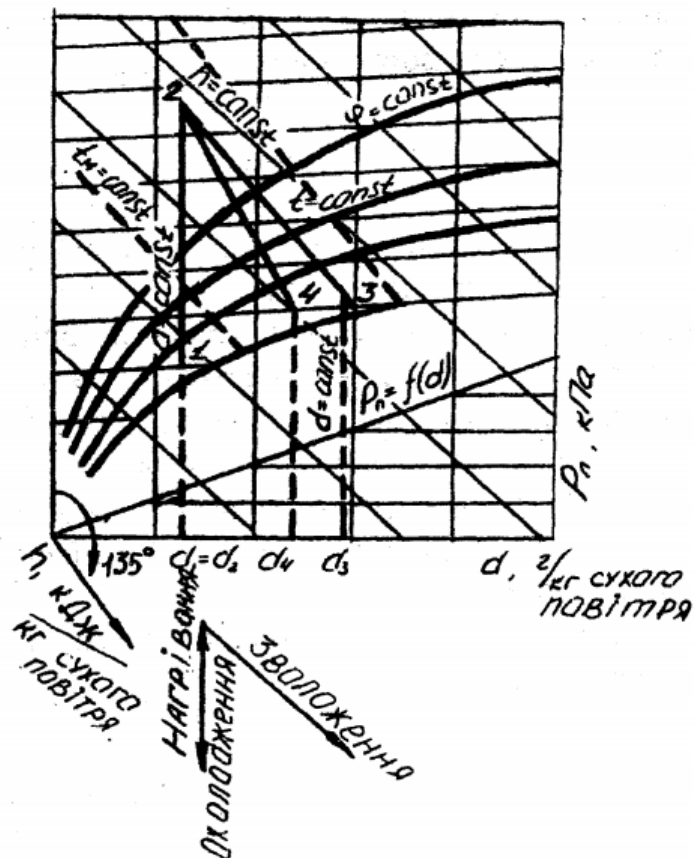


Рис. 5.2. hd – діаграма вологого повітря

У нижній частині діаграми побудована лінія парціальних тисків водяної пари $P_n = f(d)$. Відлік парціального тиску здійснюється з правого боку.

Процеси нагрівання й охолодження повітря відображаються на діаграмі вертикальною лінією (рис. 5.2, лінія 1 – 2), оскільки маси водяної пари і повітря залишаються в цих процесах сталими. Тому не змінюється і парціальний тиск P_n . При нагріванні вологість ϕ зменшується, ентальпія збільшується, а при охолодженні – навпаки.

Теплоту процесу нагрівання (охолодження) повітря знаходять за формулою:

$$q = h_2 - h_1. \quad (5.7)$$

Процес сушіння, в якому теплота витрачається тільки на випаровування води, називається теоретичним. На hd – діаграмі зміна стану повітря в такому процесі відображається лінією сталої ентальпії $h_2 = h_3 = \text{const}$ (рис. 5.2, лінія 2–3), тому що теплота, витрачена на випаровування, повністю повертається до сушильного агенту у вигляді ентальпії водяної пари, і у розрахунку на 1 кг сухого повітря ентальпія є стала величина. Сушарка, в якій здійснюється такий процес, а також не враховуються теплові втрати, називається теоретичною.

Кількість вологи, яка випаровується з матеріалу при теоретичному процесі сушіння, визначається за формулою:

$$\Delta d = d_3 - d_1. \quad (5.8)$$

В дійсному процесі сушіння теплота витрачається не тільки на випаровування вологи, але й на нагрівання матеріалу, транспортних пристроїв, ливарних форм або стержнів, на нагрівання тари (короби, піддони і т.п.). Крім того, частина теплоти втрачається шляхом передачі її до навколишнього середовища. Все це призводить до зменшення ентальпії повітря. Тому дійсний процес сушіння закінчується у точці 4, яка лежить нижче і лівіше від точки 3. Дійсний процес сушіння зображається лінією 2–4, і вологовміст повітря d_4 на виході з сушильної камери менше, ніж при теоретичному процесі сушіння.

Дійсна кількість вологи, що випаровується за реальних умов сушіння, визначається формулою:

$$\Delta d = d_4 - d_1. \quad (5.9)$$

hd – діаграма дає можливість знаходити точку роси для будь-якого стану вологого повітря. Для цього треба із даної точки, наприклад, 1, опустити

перпендикуляр до перетинання з лінією $\phi = 100\%$. Ізотерма, яка відповідає цій точці, і дасть температуру точки роси t_p .

5.3. Будова установки

Установка для вивчення властивостей вологого повітря і дослідження теоретичного і дійсного процесів сушіння зображена на рис. 5.3.

Вентилятор 7 подає повітря у калорифер 6, де повітря нагрівається до заданої температури. Витрата повітря регулюється частотою обертання вентилятора та заслінкою 8. Витрата електроенергії на нагрівання повітря вимірюється ватметром 10. Зміна частоти обертання вентилятора здійснюється за допомогою ЛАТРу 9, а потужність, яка подається на нагрівальний елемент, регулюється автотрансформатором 11. Температура повітря за калорифером вимірюється термометром 5. Матеріал, який підлягає сушінню, імітується за допомогою зволожувача 4, виконаного у вигляді двох касет з вертикально натягнутими фітілями, на які подається вода з бака 3.

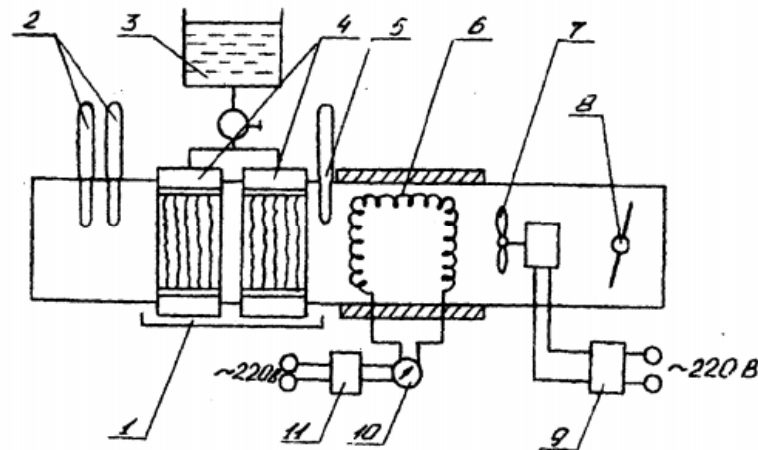


Рис. 5.3. Установка для сушіння вологим повітрям.

Подача води на касети регулюється краном. Надлишки води стікають у піддон 1. Температура після касет вимірюється термометрами 2 (сухим і мокрим), а параметри атмосферного повітря, яке надходить у калорифер – віддалік від установки.

5.3. Порядок проведення роботи

1. Відкрити краник, подати воду на касети, зволожуючи їх, а потім відрегулювати її подачу так, щоб вона стікала рівномірно у вигляді краплин.

2. Ввімкнути електронагрівач і вентилятор. Домогтися стаціонарного режиму роботи установки.

3. Занотувати показання барометра, визначити відносну вологість атмосферного повітря аспіраційним психрометром, знявши для цього показання сухого t_c і мокрого t_m термометрів.

Правила вимірювання відносної вологості аспіраційним психрометром такі. За 5 хв. до початку вимірювань змочують дистильованою водою тканину вологого термометра за допомогою піпетки, яка входить до комплекту приладу. При змочуванні необхідно остерігатись, щоб вода по з'єднувальній порожнині не попала на сухий термометр. Потім заводять ключем аспіратор (вентилятор) і через 3–4 хв. після його пуску реєструють показання сухого і мокрого термометрів.

Відносну вологість повітря знаходять з різниці показань термометрів, використовуючи таблицю даного психрометра або номограму (рис.5.4.)

4. При досягненні стаціонарного режиму роботи установки виміряти температуру повітря за калорифером і сушильної камери (мокрый і сухий термометри).

5. Результати вимірювань занести до протоколу.

6. Вимкнути установку.

7. По результатам вимірювань визначити властивості повітря розрахунковим методом і за допомогою hd – діаграми вологого повітря.

5.4. Порядок проведення розрахунків

1. Знайти парціальний тиск водяної пари в атмосферному повітрі (точка 1 на рис.5.2) по формулі

$$P_{n1} = P_{n1} - AB_0(t_c - t_m), \quad (5.10)$$

де P_{n1} – тиск насиченої пари, який визначається за температурою мокрого термометра t_m за допомогою таблиць (додаток 3), МПа; B_0 – атмосферний тиск при 0 °С, МПа, який визначається за формулою

$$B_0 = B(1 - 0.000172t_1), \quad (5.11)$$

де B – тиск, виміряний барометром, МПа; t_1 – температура атмосферного повітря, виміряна сухим термометром ($t_1 = t_{c1}$), °С; A – стала психрометра, яка дорівнює 0.000662.

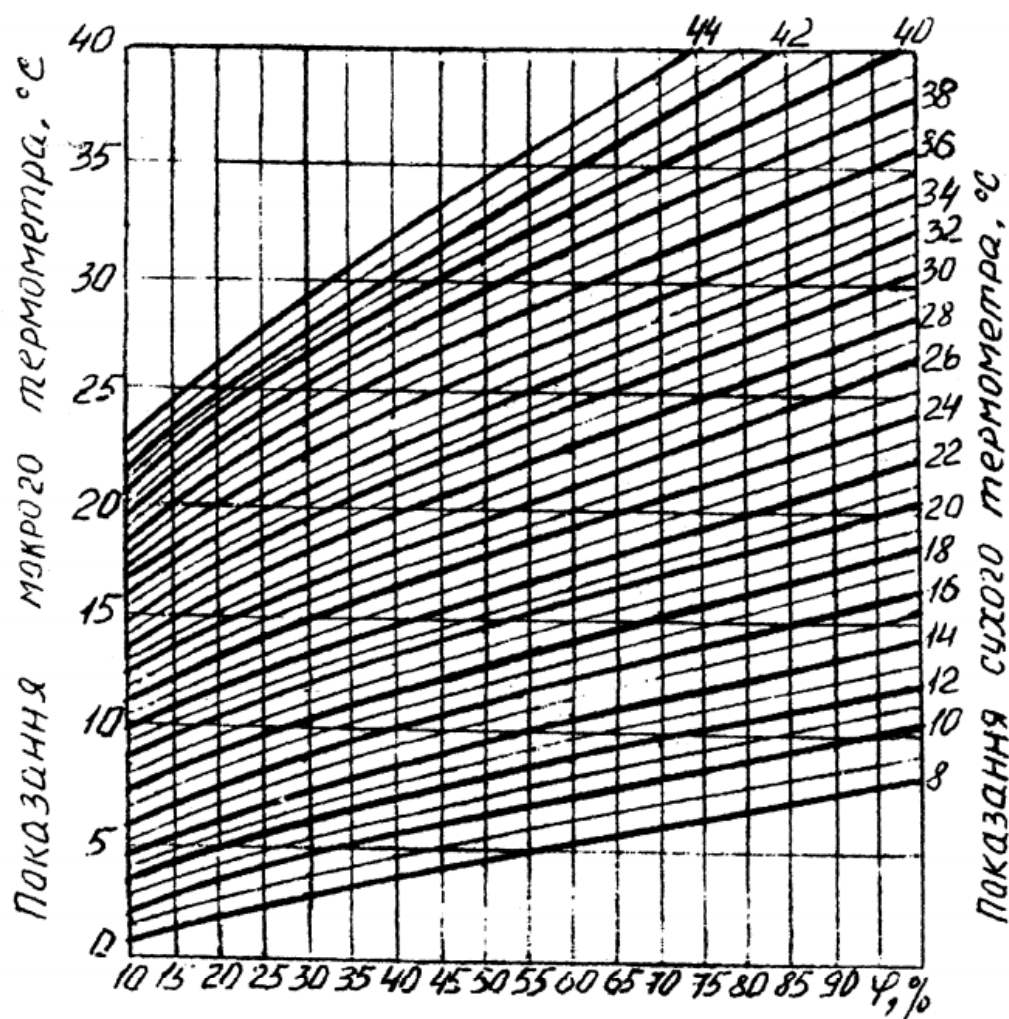


Рис. 5.4. Номограма для визначення відносної вологості повітря за показанням аспіраційного психрометра

2. Розрахувати відносну вологість атмосферного повітря за формулою (5.4) де тиск насиченої пари визначається за допомогою таблиць по температурі t_{c1} . Для порівняння визначити ϕ_1 за номограмою (рис.5.4).

3. Вологовміст повітря d_1 розрахувати за формулою (5.5).

4. Ентальпію вологого повітря обчислюємо з виразу

$$h_1 = t_1 + (2490 + 1.97t_1)d_1. \quad (5.12)$$

5. Розрахувати параметри повітря за калорифером (точка 2 на рис. 5.2) за тими ж формулами і в тій же послідовності. При цьому врахувати, що процес нагрівання повітря здійснюється при сталому значенні вологовмісту, тобто $d_1 = d_2$, $P_{n1} = P_{n2}$, барометричний тиск $B = const$, а температура повітря за калорифером t_2 .

6. Параметри повітря за теоретичною сушаркою визначають слідуочим чином: з таблиці насиченої пари (додаток 3) знайти P_{n3} , за

номограмою φ_3 , розрахувати $P_{n3} = \varphi_3 P_{n3}$ і вологовміст з (5.5).

7. Побудувати процеси нагрівання і сушіння в hd – діаграмі в такій послідовності:

- знайти на діаграмі т.1 (на перетинанні ізотерми t_{c1} і t_{m1} або ізотерми t_c і φ_1);
- побудувати процес нагрівання повітря 1 – 2 ($d_1 = const$ до перетинання з ізотермою t_3);
- побудувати теоретичний процес сушіння 2 – 3 ($h_2 = h_3$ до перетинання з ізотермою t_2);

Визначити за допомогою діаграми всі параметри для кожної точки.

8. За формулою (5.7) і (5.8) визначити кількість теплоти, витраченої на нагрівання 1 кг сухого повітря і води, яка випарилась у теоретичному і дійсному процесах сушіння.

9. Записати одержані результати в протокол і порівняти їх із розрахунковими.

10. Знайти теоретичну витрату повітря, необхідного для випаровування 1 кг води:

$$l = \frac{1000}{d_3 - d_1}. \quad (5.13)$$

та для випаровування W кг води; кг сухого повітря:

$$L = lW. \quad (5.14)$$

11. Розрахувати витрату теплоти на процес сушіння; кДж:

$$Q = qL. \quad (5.15)$$

Протокол розрахунків

Пара-Метр	Поз-на-чен-ня	Оди-ниця	Розрахунковий метод				За hd -діаграмою		
			Формула або додток	Атмосферне повітря	Повітря за калорифером	Повітря за сушильною камерою	Атмосферне повітря	Повітря за калорифером	Повітря за сушильною камерою
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Парціаль-
ний тиск
насиче-
ної пари

P_n МПа дод 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Парціаль- ний тиск водяної пари	P_n	МПа	(5.10)						
Густина насиче- ної пари	ρ_n	кг/м							
Атмос- ферний тиск, при- веде- ний до °C	B	МПа	(5.11)						
Відносна вологість	φ	%	(5.4)						
Абсо- лютна воло- гість	ρ_n	кг/м							
Волого- вміст	d	кг/кг сух.пов.	(5.5)						
Ентапія вологого повітря	h	кДж/кг сух.пов.	(5.12)						
Темпе- ратура точки роси	t_p	°C	Дод.2.						
Кіль- кість випаро- вуваної вологи	Δd	кг/кг сух.пов.	(5.8)						
Теплота підведена до кало- рифера	q	кДж/кг сух.пов.	(5.7)						

Протокол випробувань

Параметр	Позначення	Одиниця виміру	Повітря		
			Атмос-ферне	за калори-фером	за сушаркою

Атмосферний тиск

B

МПа

Температура: сухого тер-

мометра

t_c

°C

мокрого

термометра

t_m

°C

Контрольні питання

1. Що таке абсолютна і відносна вологість повітря?
2. Як впливає температура на абсолютну і відносну вологість і чому?
3. Що таке вологовміст і як він залежить від температури?
4. Що таке температура точки роси?
5. Як зобразити процеси нагрівання повітря і сушіння в hd -діаграмі?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи: експериментально визначити коефіцієнт теплопровідності твердого матеріалу; визначити залежність коефіцієнтів теплопровідності від температури.

В процесі виконання роботи необхідно вивчити слідуючі питання:

1. Фізичну суть процесу теплопровідності.
2. Основний закон теплопровідності і поняття про коефіцієнт теплопровідності.

6.1. Загальні відомості

Теплопровідність є процес розповсюдження теплової енергії при безпосередньому стиканні окремих часток або окремих тіл, що мають різні температури.

Здатність тіл проводити теплоту характеризується фізичним параметром, який називається коефіцієнтом теплопровідності, Вт/(м К):

$$\lambda = \frac{Q}{f \frac{\partial t}{\partial n}}, \quad (6.1)$$

де Q – потужність теплового потоку, Вт; f – площа, м;

$\frac{\partial t}{\partial n}$ – температурний градієнт, К/м.

Числове значення коефіцієнта теплопровідності визначає кількість теплоти, що проходить крізь одиницю поверхні в одиницю часу, при умові, що температурний градієнт дорівнює одиниці.

Коефіцієнт теплопровідності залежить від температури, тиску і роду речовини. Кращими провідниками теплоти є метали ($\lambda = 3...418$ Вт/(мК)).

Коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційних і будівельних матеріалів, які мають шпаристу структуру, змінюється в межах від 0.02 до 3.0 Вт/(мК)

Коефіцієнт теплопровідності може бути визначений методами необмеженого циліндричного шару, коли матеріалу, що досліджується, надається форма циліндричної порожньої труби; монотонного режиму, коли матеріалу, що досліджується, надається форма тонкої круглої або квадратної пластинки; кульового шару, коли матеріал, що досліджується, має форму кульового шару.

Метод необмеженого циліндричного шару

Для зменшення теплових втрат у різних теплотехнічних спорудах застосовують так звані теплоізоляційні матеріали, коефіцієнт теплопровідності яких необхідно знати. В цьому випадку коефіцієнт теплопровідності визначають методом необмеженого циліндричного шару (метод труби).

Суть методу полягає в тому, що досліджуваний матеріал у вигляді циліндричного шару розташовують на поверхні труби, яка з середини рівномірно обігрівается. При встановленому тепловому стані системи вся кількість теплоти, що виділилась з середини труби, проходить крізь шар матеріалу і визначається слідуючим рівнянням, Вт:

$$Q = \frac{\pi l (t'_{cm} - t''_{cm})}{\frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}}, \quad (6.2)$$

де l – довжина труби, м; d_1, d_2 – відповідно внутрішній і зовнішній діаметр циліндричної труби; t'_{cm}, t''_{cm} – температура відповідно внутрішньої і зовнішньої стінок ізоляційного шару, °С.

З рівняння (6.2) можна знайти коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м*К):

$$\lambda = \frac{Q \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi l (t'_{cm} - t''_{cm})}. \quad (6.3)$$

Таким чином, для визначення λ необхідно виміряти величину Q , t'_{cm}, t''_{cm} і геометричні розміри d_1, d_2, l .

6.2. Експериментальна установка

Схема експериментальної установки зображена на рис.6.1.

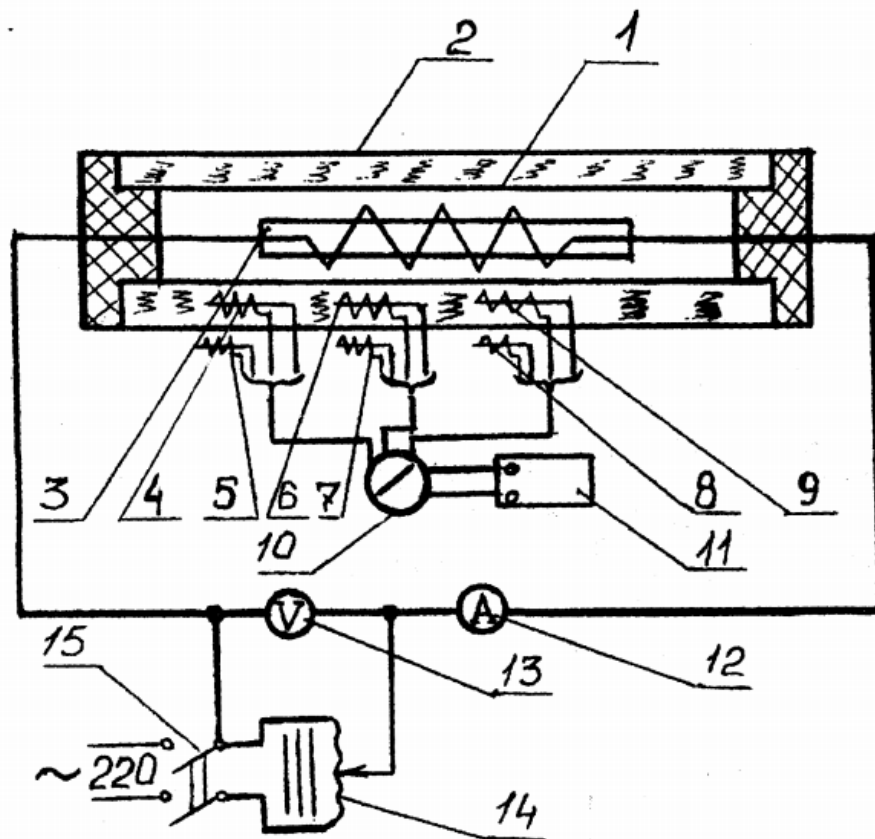


Рис.6.1. Принципова схема установки для визначення коефіцієнта теплопровідності методом труби.

На сталю трубу 1 діаметром $d = 0.07$ м і довжиною $l = 1,22$ м нанесено шар ізоляційного матеріалу 2, який досліджується товщиною $\delta = 0.0375$ м. В середині труби закладений електричний нагрівач 3. Сила струму регулюється лабораторним автотрансформатором 14. Сила струму і напруга вимірюється амперметром 12 і вольтметром 13. Температура матеріалу, що досліджується, вимірюється термометрами опору, які щільно прилягають до зовнішньої (5,7,9) і внутрішньої (4,6,8) поверхонь шару ізоляції і через перемикач 10 підключені до логометра 11.

Живлення установки здійснюється від мережі з перемінною напругою 220 В через вимикач 15.

За значенням струму і напруги в мережі визначається теплота, що виділяється нагрівачем. Циліндричний зразок має більшу довжину в порівнянні з діаметром, що дозволяє створювати рівномірний тепловий потік за довжиною при відповідній якості опору нагрівача. Для зменшення теплових втрат через торці на кінцях труби є коробки, що заповнені ізоляцією.

6.3. Порядок проведення роботи

1. Ознайомитись з лабораторною установкою, методикою проведення дослідів, приготувати протокол випробувань.

2. Оскільки для досягнення стаціонарного теплового режиму потрібно 3–4 години, лаборант повинен завчасно ввімкнути установку.

3. Для того, щоб переконатися, що тепловий режим стаціонарний, необхідно 3 – 4 рази (через 5 – 7 хвилин) зняти температурне поле. Якщо температура у кожній точці не змінюється у часі, режим усталений.

4. Зняти показання приладів.

5. За допомогою ЛАТР змінити режим і повторити дослід.

Протокол досліджень

Номер дослідів	Напруга U, В	Сила струму I, А	Температура на внутрішній поверхні ізоляції				Температура на зовнішній поверхні ізоляції			
			t' _{ст}	t'' _{ст}	t''' _{ст}	t _{срв}	t' _{ст}	t'' _{ст}	t''' _{ст}	t _{срз}
1										
2										
3										
4										

6.4. Обробка результатів дослідів

Маючи для кожної величини ряд значень, виміряних при стаціонарному режимі, обчислюють середні арифметичні значення. Звичайно для розрахунку беруть значення показань приладів з останніх трьох записів.

Коефіцієнт теплопровідності λ обчислюють за (6.3). Кількість теплоти Q визначають з потужності, що споживається електричними нагрівачами, Вт:

$$Q = U \cdot I. \quad (6.4)$$

Якщо одержані декілька значень λ при різних температурах, будують графік залежності коефіцієнта теплопровідності від середньої температури матеріалу, що досліджується:

$$\lambda = f(t_{cp}), \quad t_{cp} = \frac{t_{cp}^H + t_{cp}^C}{2}.$$

Контрольні запитання

1. Що називається теплопровідністю?
2. Яким законом описується перенос теплоти теплопровідністю?
3. Що називається коефіцієнтом теплопровідності і від чого він залежить?
4. Опишіть особливості теплопровідності різних речовин.
5. Як обчислюють тепловий потік теплопровідністю через одношарову і багатошарову стінки?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

ТЕПЛОВІДДАЧА ЦИЛІНДРИЧНОЇ ТРУБИ ПРИ ПРИРОДНІЙ КОНВЕКЦІЇ

Мета роботи: експериментально визначити коефіцієнт тепловіддачі при природній конвекції; вивчити методику коефіцієнта тепловіддачі за допомогою критеріальних рівнянь.

7.1. Загальні відомості

Теплообмін між потоком рідини або газу і поверхнею тіла, що контактує з ним, називається конвективним теплообміном або просто тепловіддачею.

Тепловіддача характеризується законом Ньютона – Ріхмана, Вт

$$Q = \alpha f_1 (t_c - t_{ж}), \quad (7.1)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м² К);

$t_c, t_{ж}$ – температура відповідно стінки і навколишнього середовища, °С;

f_1 – площа поверхні, м².

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією враховує контактні умови тепловіддачі. Згідно рівнянню (7.1)

$$\alpha_k = \frac{Q_k}{f_1 (t_c - t_{ж})}, \quad (7.2)$$

З рівняння (7.2) видно, що коефіцієнт тепловіддачі чисельно дорівнює потужності теплового потоку через поверхню теплообміну при різниці температури поверхні і навколишнього середовища в один градус.

Основні труднощі розрахунку конвективного теплообміну полягають у визначенні α_k , який залежить від багатьох факторів: фізичних властивостей рідини (густина, в'язкість, теплоємність, теплопровідність), форм і розмірів поверхні, температури поверхні і рідини, розташування поверхні у просторі, швидкості руху, природи виникнення руху рідини.

В цій роботі потрібно встановити залежність коефіцієнта тепловіддачі конвекцією від різниці температур $\Delta t = t_c - t_{ж}$, тобто $\alpha = f(\Delta t)$.

Для цього необхідно знати величину конвективного теплового потоку Q_k . Проте треба враховувати, що від нагрітої поверхні теплота Q віддається навколишньому середовищу не тільки конвекцією Q_k , але й випромінюванням у кількості Q_{λ} . Таким чином

$$Q = Q_k + Q_l, \quad (7.3)$$

Променевий тепловий потік розраховується за допомогою рівняння, Вт

$$Q_l = Cf_1 \left[\left(\frac{T_{CT}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ж}}{100} \right)^4 \right], \quad (7.4)$$

де $C = C_0 \varepsilon_{np}$ – коефіцієнт випромінювання, Вт/(м² К⁴); $C_0 = 5.67$ – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/(м² К⁴); $T_{CT}, T_{ж}$ – абсолютні температури, відповідно, стінки і рухомого середовища, °К; ε_{np} – приведений ступінь чорноти.

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{f_1}{f_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}, \quad (7.5)$$

де f_1, f_2 – площі відносно тепловіддаючої поверхні і огорожуючих стін, м².
Якщо $f_1 \gg f_2$, то $\varepsilon_{np} = \varepsilon_1$.

Ступінь чорноти залежить від роду і температури матеріалу і визначається за допомогою довідкових таблиць. Наприклад, сталь окислена шорстка має $\varepsilon = 0.94 \dots 0.97$ при $t = 40 \dots 370$ °С, алюміній шорсткий має $\varepsilon = 0.11 \dots 0.19$ при $t = 200 \dots 600$ °С.

Таким чином, якщо виміряти тепловий потік, температуру поверхні тіла і навколишнього середовища, то можна експериментально визначити коефіцієнт тепловіддачі конвекцією α_k .

На основі законів фізики можна скласти систему диференціальних рівнянь для конвективного теплообміну, що враховують як теплові так і гідродинамічні явища процесу. Зважаючи на те, що для конкретного процесу ці рівняння повинні бути доповнені умовами однозначності, математичний опис конвективного теплообміну є настільки складним, що аналітичне рішення можливе тільки внаслідок значаних допоміжних спрощень. Отримані результати аналітичних рішень, як правило, мають невелику практичну цінність. Тому для конкретних задач конвективного теплообміну коефіцієнта тепловіддачі визначають експериментальним шляхом. Але розповсюдження результату одиночного досліду на інші конкретні випадки приводить до грубих помилок, внаслідок складної залежності коефіцієнту тепловіддачі від багатьох факторів.

Об'єднання обох цих методів за допомогою теорії подібності дозволяє узагальнити результати одиничних дослідів на цілу групу подібних

явищ даного класу. На основі диференційних рівнянь за допомогою теорії подібності розмірні фізичні змінні величини можна об'єднати у безрозмірні комплекси або критерії подібності.

Теорія подібності стверджує, що залежність між змінними, які характеризують процес, може бути представлена у вигляді залежності між критеріями (числами) подібності. Така функціональна залежність між числами подібності називається рівнянням подібності.

При розв'язанні рівнянь подібності особливу увагу треба звертати на визначальну температуру і визначальний розмір l . Визначальною називається температура, за якою визначають фізичні властивості середовища, що входять в критерії подібності. Визначальний розмір – це характерний лінійний розмір, який визначає розвиток процесу.

Для круглих вертикально розташованих труб за визначальний розмір береться висота труби, для горизонтально розташованих – її зовнішній діаметр.

Вільна конвекція описується рівнянням у безрозмірному вигляді

$$Nu = f(Gr, Pr), \quad (7.6)$$

де $Nu = \alpha l / \lambda$ – критерій Нуссельта; $Gr = \frac{g \beta l^3 \Delta t}{\nu^2}$ – критерій Грасгофа; $Pr = \frac{\nu}{a}$ – критерій Прандтля; α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м² К); l – характерний розмір, м; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м² К); $\beta = \frac{1}{T_{ж}}$ – коефіцієнт об'ємного розширення, 1/К; Δt – різниця температур, °К; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м²/с; $a = \frac{\lambda}{C_p \rho}$ – коефіцієнт температуропровідності, м²/с; C_p – питома теплопровідність, Дж/(кг К); ρ – густина, кг/м³.

Залежність між критеріями встановлюється дослідним шляхом. В (7.6) визначеному числовому значенню кожного критерія відповідає нечислове значення кожного з параметрів (наприклад, для критерія Грасгофа – T, l, ν). Але кожному значенню параметра відповідає конкретний випадок. Отже, рішення у формі (7.6) справедливе для незчисленної кількості тих поодиноких випадків, у яких однакові критерії Грасгофа і Прандтля, тому воно носить узагальнений характер.

На основі рівняння (7.6) можна визначити значення числа Нуссельта, а отже, відповідне значення коефіцієнта тепловіддачі:

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{l}. \quad (7.7)$$

При проведенні лабораторної роботи повинні бути одержані дані, за допомогою яких встановлюється залежність для вільної конвекції $\alpha=f(\Delta t)$. Ця залежність може бути також описана емпіричною формулою, наданої у вигляді степенної функції

$$\alpha = C_1 (\Delta t)^n. \quad (7.8)$$

Формула (7.8) – окрема, справедлива тільки для умов досліду. Щоб результати цього досліду можна було розповсюдити на всі подібні йому процеси, необхідно навести їх у критеріях (числах) подібності, які характеризують вільну конвекцію. Тоді рівняння буде мати вигляд:

$$Nu = C(Gr Pr)^n, \quad (7.9)$$

де C, n – дослідні коефіцієнти.

Узагальнена залежність (7.9) дозволяє встановити, як впливає на коефіцієнт тепловіддачі такі величини, як геометричний розмір системи l , коефіцієнт в'язкості ν середовища і та ін., які в дослідах не вимірювалися. В результаті відпадає необхідність у проведенні додаткових вимірювань.

Тепловіддачу при вільному русі рідини у великому об'ємі можна розрахувати за таким рівнянням:

для горизонтальних труб при $10^3 < GrPr < 10^9$

$$Nu_{жcd} = 0.5 (Gr_{жcd} Pr_{жcd})^{0.25} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0.25}, \quad (7.10)$$

для вертикальних труб і плит при $10^3 < GrPr < 10^9$

$$Nu_{жcl} = 0.5 (Gr_{жcl} Pr_{жс})^{0.25} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0.25}, \quad (7.11)$$

при $Gr > 6 \cdot 10^{10}$

$$Nu_{жcl} = 0.5 (Gr_{жcl} Pr_{жс})^{0.33} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0.25}, \quad (7.12)$$

В цих рівняннях за визначальну температуру приймається температура рідини віддалік від поверхні, індекси "ж" і "с" означають, що числа подібності визначаються відповідно при визначальній температурі

рідини $t_{ж}$ і температури поверхні t_c .

Для газів $Pr = const$, а $\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} = 1$ і тому всі приведені вище формули зводяться.

В загальному випадку для тіл будь-якої форми і розміру, розташованих горизонтально і вертикально, для крапельних рідин і газів може бути використана формула А.А. Міхеєва:

$$Nu = C (Gr_c Pr_c)^n, \quad (7.13)$$

Значення коефіцієнтів C і n наведені в табл. 7.1

Таблиця 7.1

Значення сталих C і n

$(Gr Pr)_c$	C	n
$0 \dots 1 \cdot 10^{-3}$	0.5	0
$1 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$	1.18	1/8
$5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$	0.54	1/4
$2 \cdot 10^7 \dots 1 \cdot 10^{13}$	0.135	1/3

Фізичні константи λ , ν , Pr для повітря, що входять у склад чисел подібності, визначають по середній температурі граничного шару (табл. 7.2):

$$t_c = 0.5(t_c + t_{ж}).$$

Таблиця 7.2

Фізичні властивості сухого повітря при $B = 760$ мм рт. ст.

$t, ^\circ C$	$\rho, \frac{кг}{м^3}$	$C_p, \frac{кДж}{кг \cdot K}$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{Вт}{м \cdot K}$	$\alpha \cdot 10^6, \frac{м^2}{с}$	$\mu \cdot 10^6, \frac{Н \cdot с}{м^2}$	$\nu \cdot 10^{-6}, \frac{м^2}{с}$	Pr
1	2	3	4	5	6	7	8
-50	1.584	1.013	2.04	12.7	14.6	9.23	0.728
-40	1.515	1.013	2.12	13.8	15.2	10.04	0.728
-30	1.453	1.013	2.20	14.9	15.7	10.80	0.728
-20	1.395	1.009	2.28	16.2	16.2	12.7	0.716
-10	1.342	1.009	2.36	17.4	16.7	12.43	0.712

1	2	3	4	5	6	7	8
0	1.293	1.005	2.44	18.8	17.2	13.28	0.707
10	1.274	1.005	2.51	20.0	17.6	14.16	0.705
20	1.205	1.005	2.59	21.4	18.1	15.06	0.703
30	1.165	1.005	2.67	22.9	18.6	16.00	0.701
40	1.128	1.005	2.76	24.3	19.1	16.96	0.699
50	1.093	1.009	2.83	25.7	19.6	17.95	0.698
60	1.060	1.009	2.90	27.2	20.1	18.97	0.696
70	1.029	1.009	2.96	28.6	20.6	20.02	0.694
80	1.000	1.009	3.05	30.2	21.1	21.09	0.692
90	0.972	1.009	3.13	31.9	21.5	22.10	0.690
100	0.946	1.009	3.21	33.6	21.0	23.13	0.688
120	0.898	1.009	3.34	36.8	22.8	25.45	0.686
140	0.858	1.013	3.49	40.3	23.7	27.80	0.684
160	0.815	1.017	3.64	43.9	24.5	30.09	0.682
180	0.779	1.022	3.78	47.5	25.3	32.49	0.681
200	0.746	1.026	3.93	51.4	26.0	34.85	0.680
250	0.674	1.088	4.27	61.0	27.4	40.61	0.677
300	0.615	1.047	4.60	71.6	29.7	48.33	0.674
350	0.566	1.059	4.19	81.9	31.4	55.46	0.676
400	0.524	1.068	5.21	93.1	33.0	63.09	0.678

7.2. Лабораторна установка

Досліди по визначенню коефіцієнта тепловіддачі при вільній конвекції проводяться на лабораторній установці (рис 7.1), яка складається з циліндричної труби Ш180 мм і довжиною 630 мм. У середині труби встановлено електричний нагрівач 2, потужність якого регулюється ЛАТРОм 8. Споживана потужність визначається за допомогою показань амперметра 10 і вольтметра 9. З обох кінців труба закрита дисками 3, які виготовлені з теплоізоляційного матеріалу і призначені для зменшення теплових втрат крізь торці. Температура на поверхні труби вимірюється термопарами 5, холодні спаї яких виведені у коробку 4. Термопари через перемикач 6 підключені до потенціометра 7, який вимірює термоЕРС, з якої за допомогою таблиці визначається температура. Досліди можуть проводитись на двох установках, на одній з яких труба горизонтальна, а на другій – вертикальна.

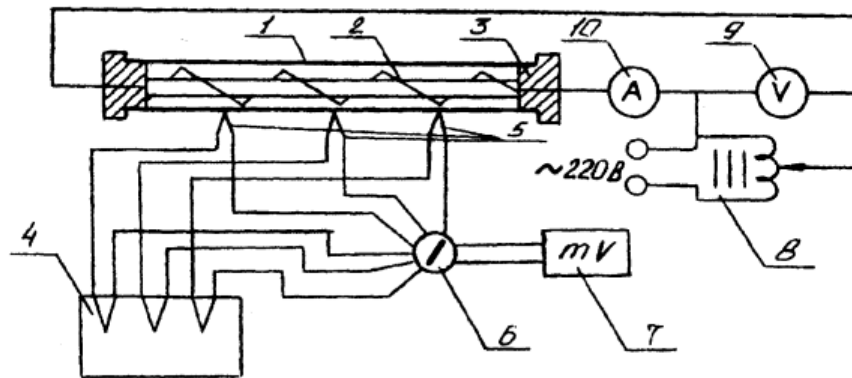


Рис . 7.1 Схема установки для дослідження теплообміну при природній конвекції

7.3. Порядок проведення роботи

Обмеженість часу при проведенні лабораторного заняття не дозволяє провести експерименти, які встановлюють залежність (7.8) Тому планом занять передбачається проведення одного–двох дослідів по визначенню коефіцієнта тепловіддачі. Потім для умов з урахуванням конкретних чинників в експерименті (температура, розташування труби, навколишнє середовище – повітря, геометричні розміри труби) обчислюють коефіцієнт тепловіддачі за критеріальним рівнянням і порівнюють з експериментальним.

Послідовність проведення роботи

1. Ввімкнути установку і за допомогою ЛАТРа встановити режим нагрівання.
 2. Домогтися стаціонарного стану тепловіддачі, який характеризується сталими за часом показаннями термопар. До вимірювань температури можна приступити через 20–40 хвилин після ввімкнення установки. Необхідно пам'ятати, що, чим більша сила струму і більше його напруга, тим більший час потрібен для досягнення стаціонарного режиму.
 3. Записати показання амперметра, вольтметра і виміряти термоЕРС усіх термопар. Для контролю необхідно повторити запис показань приладів декілька разів з інтервалом 5–10 хвилин.
 4. Змінити температурний режим. Для цього зменшити або збільшити витрату електроенергії.
 5. Досліди проводяться при умові, що режим руху повітря біля стінок труби сталий, тому їх слід проводити при закритих дверях і вікнах і відсутності руху повітря в лабораторії.
 6. Після закінчення дослідів вимкнути установку із мережі.
- Результати вимірювань заносяться у протокол.

Протокол вимірювань

Параметр	Поз-начен-ня	Од. вимі-рюв.	І дослід			ІІ дослід			ІІІ дослід		
			Вимірювання								
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
Сила струму	<i>I</i>	А									
Напруга	<i>U</i>	В									
ТермоЕРС	<i>E</i>	МВ									
Термопара 1											
Термопара 2											
Термопара 3											
Температура навко-лишнього середовища	<i>t_ж</i>	°С									

7.4. Обробка результатів вимірювань

1. Обчислити для кожного дослідів середні значення термоЕРС:

$$E = \frac{(E_1 + E_2 + E_3)}{n}, \quad (7.14)$$

де n – число вимірювань.

2. Обчислити по таблиці значення температур.
3. Розрахувати загальну електричну потужність, яка дорівнює тепловому потоку:

$$Q = IU \cos \varphi. \quad (7.15)$$

4. Розрахувати променевий тепловий потік за формулою (7.4).
5. Визначити конвективний тепловий потік за формулою (7.3).
6. Розрахувати α_k за формулою (7.2).
7. Для порівняння розрахувати α критеріальним методом, для чого
 - по визначальній температурі з табл.7.2 знайти значення фізичних параметрів повітря (λ , ν , Pr);
 - обчислити критерій Грасгофа і добуток $GrPr$;
 - вибрати одну із розрахункових формул (7.8) – (7.12) з урахуванням визначальної температури і добутку $GrPr$;
 - розрахувати критерій Нуссельта і за формулою цього критерія –

коефіцієнт тепловіддачі α_k ;

- порівняти розрахунковий коефіцієнт тепловіддачі з дослідним. Розбіжність не повинна перевищувати $\pm 25\%$.

7.5. Контрольні запитання та завдання

1. Що називається конвективним теплообміном?
2. Як розрізняють види конвекції?
3. Які Ви знаєте режими руху рідини і які їхні відмінності?
4. Дайте визначення і характеристику гідродинамічного і теплового пограничних шарів.
5. Який механізм передачі теплоти при ламінарному і турбулентному русі рідини?
6. Напишіть рівняння закону тепловіддачі.
7. Дайте визначення коефіцієнта тепловіддачі. Від чого він залежить?
8. Чому для визначення коефіцієнта тепловіддачі застосовують теорію подібності?
9. Яке рівняння називається рівнянням подібності при конвективному теплообміні?
10. Як записується в загальному вигляді рівняння конвективної тепловіддачі при природній конвекції у критеріальній формі?
11. Запишіть формули чисел подібності, які характеризують конвективний теплообмін і поясніть фізичний зміст цих чисел.
12. Запишіть рівняння закону Стефана–Больцмана для сірого тіла.
13. Яке тіло називають абсолютно чорним і що таке ступінь чорноти сірого тіла?

Протокол обчислень

Параметр	Позначення	Один. вимірюв.	Формула	Дослід		
				1	2	3
1	2	3	4	5	6	7

Сила струму	I	А				
Напруга	U	В				
$\cos\varphi$	—	—				0.90...0.95
Загальна потужність теплового потоку	Q	Вт	(7.15)			
Ступінь чорноти	ϵ	—				
Площа поверхні труби	f	м ²				
Середня термоЕРС	E_{cp}	мВ	(7.14)			
Температура поверхні	t_{ct}	°С	табл. 1.2			

1	2	3	4	5	6	7
Потужність променистого потоку	Q	Вт	(7.4)			
Потужність конвективного потоку	Q	Вт	(7.3)			
Дослідний коефіцієнт тепловіддачі	α_k	Вт/(м ² К)	(7.2)			
Визначальна температура	$t_{ж}$ t_c					
Коефіцієнт теплопровідності	λ	Вт/(м К)	таб 7.2			
Коефіцієнт кінематичної в'язкості	ν	м ² /с				
Критерій Прандтля	Pr					
Критерій Грасгофа	Gr		(7.6)			
Добуток	$GrPr$					
Коефіцієнти:	C		(7.10) – (7.12)			
	n		або табл. 7.1			
Критерій Нуссельта	Nu		(7.9)			
Розрахунковий коефіцієнт тепловіддачі	α_k	Вт/(м ² К)	(7.7)			

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8

ВИПРОБУВАННЯ АВТОНОМНОГО КОНДИЦІОНЕРА

Мета роботи: визначити зміну параметрів повітря, обробленого в кондиціонері; розрахувати продуктивність кондиціонера по повітрю; знайти холодовидатність кондиціонера і масу вологи, яка випадає з повітря за одиницю часу.

8.1. Загальні відомості

Кондиціонер – автоматично діюча установка, яка призначена для створення і підтримання в приміщенні мікроклімату певних параметрів (кондицій). Оптимальні значення параметрів повітряного середовища встановлюється санітарно-гігієнічними нормами в залежності від призначення виробничих приміщень, категорії робіт і періоду року (літній або зимовий).

Системи кондиціювання повітря диференціюють на центральні, місцеві і автономні.

В центральних системах повітря, оброблене в одній спільній установці, яка включає холодильні машини і кондиціонери, подається розподільними повітропроводами в різні приміщення будівлі. В місцевих системах відбувається централізоване виробництво холоду і децентралізована обробка повітря в місцевих кондиціонерах, встановлених в окремих приміщеннях. В автономних системах кондиціонери мають свої джерела тепла і холоду, які є їх конструктивними елементами. Для обслуговування кожного приміщення використовується свій автономний кондиціонер. Обробка повітря в кондиціонері перед його подачею в приміщення передбачає наступні основні процеси: підігрів або охолодження, зволоження або осушення, а також очистку від пилу. Для більшості кліматичних районів нашої держави в зимовий час треба підігрівати і зволожувати приточне повітря, а в літній – охолоджувати й осушувати.

За схемою обробки повітря системи кондиціювання поділяються на прямоточні, які характеризуються обробкою лише зовнішнього повітря, і рециркуляційні, які характеризуються обробкою в кондиціонерах суміші зовнішнього рециркуляційного повітря. Найбільш економічні системи другого типу, оскільки в них у зимовий період менше витрачається теплоти на підігрів зовнішнього повітря, а в літній – заощаджується витрата холоду на його охолодження.

Процеси змішування й охолодження повітря, яке оброблюється в кондиціонері, з рециркуляцією для літнього періоду в $h-d$ – діаграмі, зображених на рис. 8.1.

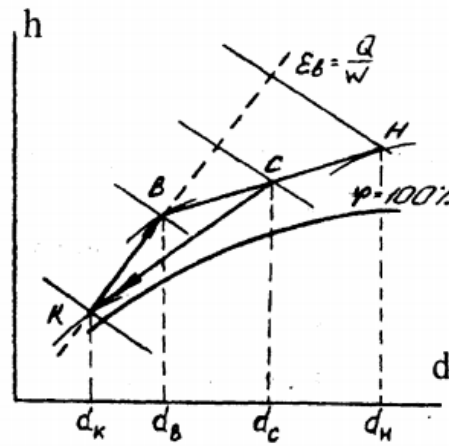


Рис. 8.1. Схематичне зображення процесу кондиціювання повітря у літній період в hd – діаграмі

Суміш зовнішнього і внутрішнього (рециркуляційного) потоків повітря, яке надходить на обробку в кондиціонер, на hd – діаграмі зображується точкою C , що знаходиться на прямій, яка сполучає точки H і B , відповідні початковим становищам зовнішнього і внутрішнього повітря.

Точка C знаходиться на відстані від точок H і B , обернено пропорційній змішуванню масам зовнішнього G_H і внутрішнього G_B повітря:

$$\frac{BC}{(HC)} = \frac{G_H}{G_B} = \frac{(d_c - d_a)}{(d_n - d_c)}. \quad (8.1)$$

Повітря в кількості $G = G_H + G_B$, яке оброблене в кондиціонері до кінцевого стану K (процес обробки умовно показано лінією CK), надходить у кондиційоване приміщення, нагрівається і зволожується в ньому (процес KB).

Надлишок повітря у кількості G_H вилучається з приміщення через нещільності або за допомогою витяжної вентиляції і процес кондиціювання повторюється.

Необхідний тепловий і вологісний баланс приміщення забезпечується кондиціонером при виконанні таких умов:

$$Q = G(h_B - h_K); \quad (8.2)$$

$$W = G(d_B - d_K), \quad (8.3)$$

де Q – тепловий потік, який вилучається з приміщення, кВт; h_B, h_K – ентальпія повітря відповідно у приміщенні до і після кондиціонера, кДж/кг; W – маса вологи, що вилучається з приміщення, кг/с; d_B, d_K – вологовміст повітря, відповідно в середині приміщення і після кондиціонера, кг/кг.

Поділивши Q на W , одержимо:

$$\varepsilon_B = \frac{Q}{W} = \frac{(h_B - h_K)}{(d_B - d_K)}, \quad (8.4)$$

де ε_B – тепловологісне відношення, або кутовий коефіцієнт променя процесу зміни стану повітря у кондиційованому приміщенні, кДж/кг

Параметри повітря h_B і d_B у кондиційованому приміщенні повинні бути завжди сталими, не зважаючи на те, що в умовах експлуатації значення тепловиділення Q і вологовиділення W змінні. Оскільки кількість повітря G , яка подається в приміщення, звичайно стала, для задоволення рівнянь (8.2) і (8.3) тепловологісного балансу параметри кондиційованого повітря h_K і d_K повинні мати можливість змінюватись у певних межах. Для того, щоб одночасно поглинути надлишок теплоти і вологи (в літній час), точка K , яка характеризує кондиційоване повітря, повина завжди залишатись на лінії постійного тепловологісного відношення, що проходить під кутом, визначеним значенням ε_K .

8.2. Лабораторна установка

Об'єктом випробувань є автономний кондиціонер БК–2500, який забезпечує: охолодження повітря, автоматичну підтримку заданої температури, очищення повітря від пилу, осушку повітря від надлишкової вологості.

Всі вузли кондиціонера змонтовані на металевій рамі. На рис. 8.2 зображена принципова схема кондиціонера. Металевою перегородкою з теплозвуковою ізоляцією корпус поділений на два герметичних відсіка: зовнішній і внутрішній. В перегородці передбачено отвір, що перекривається заслінкою, за допомогою якої регулюють приток зовнішнього повітря (до 15 %) в приміщенні.

У зовнішньому відсіку, розташованому за вікном, розміщені: герметичний компресор, який працює на фреоні, конденсатор, який обдувається повітрям за допомогою осьового вентилятора, електродвигун. У внутрішньому відсіку розташовані випарник холодильної машини, повітряний фільтр і відцентровий вентилятор, який нагнітає повітря у приміщення. Зовнішній відсік сполучається з атмосферним повітрям, а внутрішній – з повітрям кондиційованого приміщення. Схема руху повітряних потоків показана на рис. 8.3.

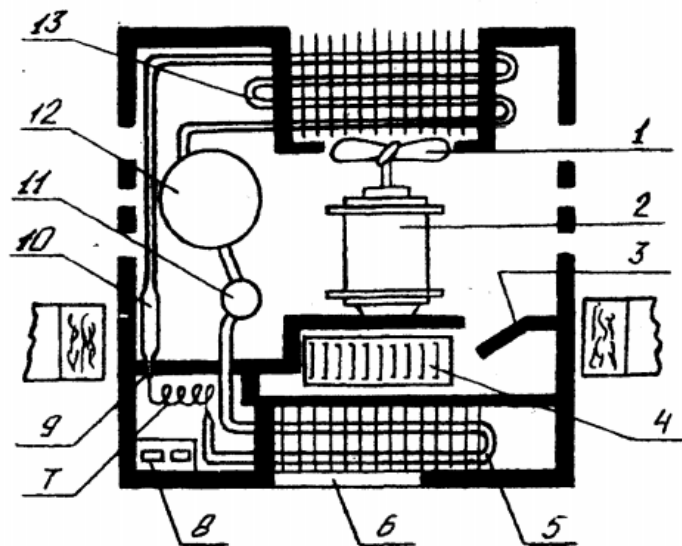


Рис. 8.2. Принципова схема побутового кондиціонера:

1 — вентилятор осьовий; 2 — електродвигун вентиляторів; 3 — заслінка; 4 — вентилятор відцентровий; 5 — випарник; 6 — фільтр повітряний; 7 — перегородка; 8 — пульт управління; 9 — капілярна трубка; 10 — фільтр-осушувач; 11 — розширювач; 12 — компресор ротаційний; 13 — конденсатор.

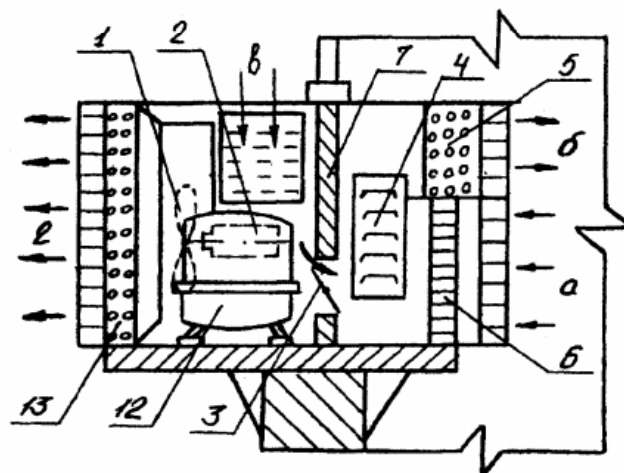


Рис 8.3 Схема руху повітряних потоків в кондиціонері:

а — вхід рециркуляційного повітря приміщення;
б — вихід охолодженого повітря в приміщення;
в — вхід зовнішнього повітря;
г — вихід нагрітого повітря назовні.

Робота кондиціонера здійснюється таким чином. Зовнішнє повітря, яке засмоктується вентилятором 1 через жалюзі в, подається на охолодження конденсатора 13 і через жалюзі 2 виходить назовні. Повітря, яке надходить з приміщення, очищується у фільтрі 6 і вентилятором 4 подається у випарник 5

холодильної машини. Охолоджене у випарнику повітря надходить в приміщення.

Холодильний агрегат використовується для охолодження повітря і складається з ротаційного компресора, конденсатора, випарника, осушувача, розширювача і системи трубопроводів, які утворюють герметично замкнуту систему.

Привід вентиляторів здійснюється від спільного електродвигуна. При випробуванні кондиціонера необхідно вимірювати температуру і відносну вологість повітря. Ці параметри визначаються за допомогою аспіраційних психрометрів, розміщених на гачках біля захисних решіток зовнішнього (в), рециркуляційного (д) і випускного (б) вікон кондиціонера з таким розрахунком, щоб вхідні отвори захисних трубок термометрів знаходились в центрі вікон. Швидкість повітря у вихідному вікні (б) вимірюється анемометром.

8.3. Порядок проведення роботи

1. Ознайомитись з обладнанням кондиціонера на місці. На передній стінці кондиціонера є панель управління, на якій розташовані ручки перемикача режимів роботи, регулятора температури і управління положенням заслонки.

2. Підготувати кондиціонер до пуску. Перевірити наявність фільтра, і якщо необхідно, очистити його від пилу. Потім поставити перемикач в положення "Викл." і вставити вилку в розетку.

3. Включити кондиціонер в роботу поворотом ручки перемикача в одне з чотирьох положень відповідно з бажаним режимом. У режимі "Конд" (кондиціювання) знижується температура в приміщенні, вентилюється і очищається повітря від пилу, а також зменшується його вологість.

У режимі "Вентил" (вентиляції) здійснюється циркуляція повітря в приміщенні без зниження температури й очистка його від пилу.

Бажану температуру повітря у режимі "Конд" треба задати поворотом ручки регулятора температури з положення "1" до "3" (слабе охолодження), в положення "6" (нормальне охолодження) або в положення "9" (сильне охолодження).

Після пуску кондиціонера ручку заслонки перевести в положення "Откр" (відкрито). При бажанні кондиціонер може працювати з закритою заслонкою. Для цього ручку необхідно перевести в положення "Закр" (закрито).

4. Після виходу кондиціонера на усталений режим провести всі необхідні вимірювання 3–5 разів:

а) середню швидкість потоку повітря у вихідному вікні кондиціонера визначають анемометром, рівномірно і послідовно переміщуючи його по всій площі решітки вікна;

б) показання сухого і мокрого термометрів по психрометрам, розташованим у зовнішнього, рециркуляційного і випускного вікон

кондиціонера, знімають одночасно;

5. Після закінчення випробувань вимкнути кондиціонер, для чого поставити перемикач режимів роботи в положення "Выкл" (вимкнуто) і відключити від мережі.

6. Результати випробувань і наступні обчислення занести в протокол випробувань.

7. Виміряти площу $F, \text{м}^2$ випускного вікна кондиціонера.

Протокол випробувань

Параметр			№ вимір.			Середнє значення
			1	2	3	
Повітря	Зовніш-не	Температура термометра сухого t_c морого t_m	n	n		
	Внутріш-не (рециркуляційне)	Температура термометра сухого t_c морого t_m	$в$	$в$		
	Кондиційоване	Температура термометра сухого t_c морого t_m	$к$	$к$		
	швидкість повітря	$v, \text{м/с}$				

8.4. Обробка результатів вимірювань

За середніми арифметичними значеннями температур зовнішнього, внутрішнього і кондиційованого повітря за номограмою (рис.5.4) визначити відносну вологість і на h_d – діаграмі знайти положення точок H, B, K , а використовуючи формулу (8.1) і точку C , яка характеризує змішане повітря перед обробкою в кондиціонері. За допомогою h_d – діаграми визначити ентальпії і вологовміст характерних точок.

Протокол обчислень

Величина	Позначення	Одиниця виміру	Формули для обчислення	Значення в точках			
1	2	3	4	5	6	7	8
Відносна вологість	φ	%	рис. 5.4.				
Ентальпія повітря	h	кДж/кг	дод. 5.				
Вологовміст	d	кг/кг сух. пов	5.5				
Продуктивність кондиціонера по повітрю	G	кг/с	$v_{cp} \rho F$				
Витрата рециркуляційного повітря	G_v	кг/с	$G - G_n$				
Витрата зовнішнього повітря	G_n	кг/с	$0.15G$				
Холодовидатність кондиціонера	Q	кВт	$G_{сух}(h_c - h_k)$				
Видатність кондиціонера по сухому повітрю	$G_{сух}$	кг сух. пов./с	$G/(1 + 0.001d_g)$				
Маса вологи, яка випадає з повітря	W	кг/с	$G_{сух}(d_c - d_k)$				

Контрольні запитання і завдання

1. В чому суть кондиціювання повітря?
2. Які існують системи кондиціювання?
3. Як визначити стан після змішування зовнішнього і рециркуляційного потоків повітря?
4. Як зображується в $h-d$ – діаграмі процес кондиціювання з рециркуляцією повітря приміщення?
5. При яких умовах кондиціонер забезпечує тепловий і вологий баланс приміщення?
6. З яких елементів складається автономний кондиціонер і як він працює?

Список літератури

1. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача: Учебное пособие для неэнергетических специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1975. – 496 с.
2. Теплотехника: Учебник для студентов вузов / Под ред. А.П. Баскакова. – М.: Энергоиздат, 1982. – 264 с.
3. Теплотехника: Учебник для студентов / Под общ. ред. В.И. Крутова. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.
4. К.В. Тихомиров. Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция. – М.: Стройиздат, 1981. – 268 с.
5. Б.Х. Драганов, А.А. Долінський, А.В. Міщенко, Є.М. Письменний (за ред. Б.Х. Драганова). Теплотехніка: Підручник. – Київ: "ІНК ОС". – 2005. – 504 с.
6. Булярда О.Ф. Технічна термодинаміка. – К.: Вища школа, 2001. – 320 с.
7. Алабовский А.Н., Недужий Й.А. Техническая термодинамика и теплопередача. – Киев.: Вища школа, 1990. – 248 с.
8. Швець Й.Т. и др. Теплотехника: Учебник для студентов вузов – Киев.: Вища школа, 1976. – 517 с.

Середня мольна теплоємність при сталому тиску
(по спектроскопічним даним)

$t, ^\circ\text{C}$	$\mu_{C_p}, \text{кДж/(кмоль}\cdot\text{K)}$						
	H_2	N_2	O_2	Повітря сухе	CO_2	H_2O	CO
0	28,62	29,12	29,27	29,07	35,86	33,50	29,12
100	28,93	29,14	29,54	29,15	38,11	33,74	29,18
200	29,07	29,23	29,93	29,30	40,06	34,12	29,30
300	29,12	29,38	30,40	29,52	41,76	34,58	29,52
400	29,16	29,60	30,88	29,79	43,25	35,09	29,79
500	29,25	29,86	31,33	30,10	44,57	35,63	30,10
600	29,32	30,15	31,76	30,41	45,75	36,20	30,42
700	29,41	30,45	32,15	30,72	46,81	36,79	30,75
800	29,52	30,75	32,50	31,03	47,76	37,39	31,07
900	29,65	31,04	32,83	31,32	48,62	38,01	31,38
1000	29,79	31,31	33,12	31,60	49,40	38,62	31,67
1100	29,94	31,58	33,39	31,86	50,10	39,23	31,94
1200	30,11	31,83	33,63	32,11	50,74	39,83	32,19

Суха насичена пара і вода на кривій насичення
 . (по тискам)

p , МПа	t_H , °C	v' , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	h , кДж/кг	s' , кДж/(кг·К)	s'' , кДж/(кг·К)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0010	6,936	0,0010001	130,04	29,18	2513,4	2484,2	0,1053	8,9749
0,0020	17,486	0,0010014	67,24	73,40	2533,1	2459,7	0,2603	8,7227
0,0040	28,95	0,0010042	34,93	121,33	2553,7	2432,3	0,4225	8,4737
0,0060	36,17	0,0010065	23,77	151,49	2567,1	2415,6	0,5209	8,3297
0,0080	41,53	0,0010085	18,13	173,89	2576,4	2402,5	0,5919	8,2263
0,0100	45,82	0,0010102	14,70	191,84	2583,9	2392,1	0,6496	8,1494
0,014	52,57	0,0010132	10,69	220,05	2596,1	2376,0	0,7368	8,0305
0,018	57,82	0,0010159	8,448	242,03	2605,4	2363,3	0,8040	7,9445
0,020	60,08	0,0010171	7,652	251,48	2609,2	2357,7	0,8324	7,9075
0,040	75,87	0,0010264	3,999	317,62	2636,3	2318,7	1,0261	7,6710
0,060	85,94	0,0010330	2,734	359,90	2653,1	2293,2	1,1453	7,5313
0,080	93,50	0,0010385	2,089	391,75	2665,3	2273,5	1,2331	7,4342
0,10	99,62	0,0010432	1,696	417,47	2674,9	2257,5	1,3026	7,3579
0,14	109,31	0,0010509	1,237	458,42	2690,1	2231,7	1,4109	7,2460
0,20	120,23	0,0010606	0,8860	504,74	2706,8	2202,0	1,5306	7,1279
0,24	126,09	0,0010659	0,7469	529,9	2714,9	2185,0	1,5931	7,0658

Закінчення додатка 2

1	:	2	:	3	:	4	:	5	:	6	:	7	:	8	:	9
0,30		133,54		0,0010733		0,6055		661,7		2725,5		2163,9		1,6716		6,9922
0,40		143,62		0,0010836		0,4623		604,6		2738,7		2134,1		1,7766		6,8969
0,50		151,84		0,0010927		0,3749		640,1		2748,8		2108,7		1,8605		6,8221
1,0		179,88		0,0011273		0,1945		742,7		2777,7		2031,0		2,0945		6,6223
1,5		198,28		0,0011538		0,1317		844,5		2791,8		1947,3		2,3148		6,4458
2,0		212,37		0,0011768		0,09961		908,6		2799,2		1890,7		2,4471		6,3411
3,0		233,87		0,0012164		0,06663		1008,4		2803,1		1794,7		2,6455		6,1859
4,0		250,33		0,0012520		0,04977		1087,5		2800,6		1713,2		2,7965		6,0689
6,0		275,56		0,00131185		0,03243		1213,9		2784,4		1570,5		3,0276		5,8894
8,0		294,98		0,0013838		0,02352		1317,3		2758,6		1441,2		3,2079		5,7448
10,0		310,96		0,0014522		0,01303		1407,9		2724,6		1316,9		3,3601		5,6147
12,0		324,64		0,001527		0,01426		1491,1		2684,6		1193,5		3,4966		5,4930
14,0		336,63		0,001611		0,01149		1570,8		2637,9		1067,0		3,6233		5,3731
16,0		356,96		0,001839		0,007509		1732,2		2510,6		778,4		3,8708		5,1054
22,0		373,71		0,00269		0,00378		2009,7		2195,6		185,9		4,2943		4,5815
22,1		374,15		0,00326		0,00326		2084,0		2084,0		0		4,4062		4,4062

Насичена пара і вода на лінії насичення
(по температурам)

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{МПа}$	$v', \text{м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{м}^3/\text{кг}$	$h', \text{кДж/кг}$	$h'', \text{кДж/кг}$	$\rho_s, \text{кг/кг}$	$S', \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$S'', \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,0006108	0,0010002	206,321	-0,04	2501,0	2501,0	-0,0002	9,1565
10	0,0012271	0,0010003	106,419	41,99	2519,4	2477,4	0,1510	9,9009
20	0,0023368	0,0010017	57,833	83,86	2537,7	2453,8	0,2963	8,6674
30	0,0042417	0,0010043	32,929	125,66	2555,9	2430,2	0,4365	8,4537
40	0,0073749	0,0010078	19,548	167,45	2574,0	2406,5	0,5721	8,2576
50	0,012335	0,0010121	12,048	209,26	2591,8	2382,5	0,7035	8,0771
60	0,019919	0,0010171	7,6807	251,09	2609,5	2358,4	0,8310	7,9106
70	0,031161	0,0010228	5,0479	292,97	2626,8	2333,8	0,9548	7,7565
80	0,047359	0,0010292	3,4104	334,92	2643,8	2308,9	1,0752	7,6135
90	0,070108	0,00110361	2,3624	376,94	2660,3	2283,4	1,1925	7,4805
100	0,101325	0,0010437	1,6738	419,06	2676,3	2257,2	1,3069	7,3564
120	0,19854	0,0010606	0,89202	503,07	2706,6	2202,9	1,5276	7,1310
140	0,36136	0,0010801	0,50875	589,1	2734,0	2144,9	1,7390	6,9307
160	0,61804	0,0011022	0,30685	675,5	2757,7	2082,2	1,9425	6,7498
180	0,10027	0,0011275	0,19381	763,1	2777,1	2014,0	2,1393	6,5838
200	1,5551	0,00115665	0,12714	852,4	2791,4	1939,0	2,3307	6,4289

Закінчення додатку 3

1	:	2	:	3	:	4	:	5	:	6	:	7	:	8	:	9
220		2,3201		0,0011900		0,08602		943,7		2799,9		1856,2		2,5178		6,2819
240		3,3480		0,0012291		0,05964		1037,6		2801,6		1764,0		2,7021		6,1397
260		4,6940		0,0012756		0,04212		1135,0		2795,2		1660,2		2,8850		5,9989
280		6,4191		0,0013324		0,03010		1237,0		2778,6		1541,6		3,0687		5,8555
300		8,5917		0,00114041		0,02162		1345,4		2748,4		1403,0		3,2559		5,7038
320		11,290		0,0014995		0,01544		1463,4		2699,6		1236,2		3,4513		5,5356
340		14,608		0,0016390		0,01078		1596,8		2622,3		1025,5		3,6638		5,3363
360		18,674		0,0018930		0,006970		1763,1		2485,7		722,6		3,9189		5,0603
374		22,084		0,002834		0,003482		2039,2		2150,7		111,5		4,3374		4,5096

Примітка. Параметри критичного стану: тиск 22,115 МПа, температура 374,12°C, питомий об'єм 0,003147 м³/кг.

Питомі об'єми і ентальпії перегрітої водяної пари
при різних тисках

$t, ^\circ\text{C}$	1,2 МПа		1,4 МПа		1,6 МПа		1,8 МПа		2,0 МПа		2,2 МПа		2,4 МПа	
	v	h	v	h	v	h	v	h	v	h	v	h	v	h
	$\text{м}^3/\text{кг}$	$\text{кДж}/\text{кг}$	$\text{м}^3/\text{кг}$	$\text{кДж}/\text{кг}$	$\text{м}^3/\text{кг}$	$\text{кДж}/\text{кг}$	$\text{м}^3/\text{кг}$	$\text{кДж}/\text{кг}$	$\text{м}^3/\text{кг}$	$\text{кДж}/\text{кг}$	$\text{м}^3/\text{кг}$	$\text{кДж}/\text{кг}$	$\text{м}^3/\text{кг}$	$\text{кДж}/\text{кг}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
240	0,188	2912	0,160	2904	0,138	2895								
250	0,192	2935	0,164	2928	0,142	2919	0,125	2911	0,112	2903	0,100	2894	0,091	2885
280	0,205	3002	0,175	2996	0,152	2990	0,134	2983	0,120	2977	0,108	2970	0,098	2963
290	0,210	3024	0,179	3019	0,155	3013	0,137	3007	0,123	3001	0,111	2994	0,101	2988
300	0,214	3046	0,182	3041	0,159	3035	0,140	3030	0,126	3024	0,113	3018	0,103	3012
310							0,143	3052	0,128	3047	0,116	3042	0,106	3036
320							0,146	3075	0,131	3070	0,118	3065	0,108	3060
330							0,149	3097	0,133	3092	0,121	3088	0,110	3083
340							0,152	3119	0,136	3115	0,123	3110	0,112	3006
350							0,155	3141	0,137	3137	0,126	3133	0,115	3129
360							0,157	3164	0,141	3160	0,128	3156	0,117	3152
380							0,163	3208	0,146	3204	0,133	3200	0,121	3197
390							0,166	3230	0,149	3226	0,135	3223	0,123	3219
400							0,168	3251	0,151	3248	0,137	3245	0,125	3242

Закінчення додатку 4

t °C	3,0 МПа		3,2 МПа		3,4 МПа		4,0 МПа		4,2 МПа		4,4 МПа	
	ν	h	ν	h	ν	h	ν	h	ν	h	ν	h
	$\text{м}^3/\text{кг}$	кДж/кг	$\text{м}^3/\text{кг}$	кДж/кг	$\text{м}^3/\text{кг}$	кДж/кг	$\text{м}^3/\text{кг}$	кДж/кг	$\text{м}^3/\text{кг}$	кДж/кг	$\text{м}^3/\text{кг}$	кДж/кг
280	0,0772	2942	0,0718	2934	0,0670	2972						
300	0,0812	2994	0,0756	2986	0,0707	2962	0,0589	2962	0,0557	2955	0,0527	2946
310	0,0831	3019	0,0775	3014	0,0725	3008	0,0605	2990	0,0572	2983	0,0542	2977
320	0,0850	3044	0,0793	3033	0,0610	3016	0,0587	3010	0,0557	3010	0,0557	3005
330	0,0869	3068	0,0810	3063	0,0759	3058	0,0635	3042	0,0601	3037	0,0571	3032
340	0,0887	3092	0,0828	3087	0,0776	3083	0,0650	3068	0,0616	3063	0,0585	3058
350	0,0905	3116	0,0845	3111	0,0792	3107	0,0665	3093	0,0630	3088	0,0597	3084
360	0,0923	3139	0,0862	3135	0,0808	3131	0,0679	3118	0,0644	3114	0,0612	3109
370	0,0941	3163	0,0879	3159	0,0824	3155	0,0693	3143	0,0657	3139	0,0625	3134
380	0,0959	3186	0,0896	3182	0,0840	3178	0,0707	3167	0,0671	3163	0,0638	3159
390	0,0976	3209	0,0912	3205	0,0856	3202	0,0720	3191	0,0684	3187	0,0651	3184
400	0,0993	3232	0,0929	3228	0,0871	3225	0,0734	3215	0,0699	3211	0,0663	3208
420	0,1030	3277	0,0961	3274	0,0902	3271	0,0761	3261	0,0722	3258	0,0688	3255
440	0,1060	3329	0,0993	3319	0,0932	3316	0,0787	3308	0,0746	3305	0,0712	3302
460							0,0813	3354	0,0733	3351	0,0736	3348

Додаток 5

Фізичні параметри для сухого повітря при тиску 101325 Н/м²

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$	$\lambda \cdot 10^{-2}, \text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$	$\alpha \cdot 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^{-6}, \text{Н} \cdot \text{с/м}^2$	$\gamma \cdot 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$	ρ_2
-50	1,584	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	11,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,696
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,033	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677

Фізичні параметри води на лінії насичення

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{Па}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$\alpha \cdot 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^{-6}, \text{Н}\cdot\text{с/м}^2$	$\gamma \cdot 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$	$1/K$	ρ_v
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1,013	999,9	4,212	0,560	13,2	1788	1,789	-0,63	13,5
10	1,013	999,7	4,191	0,560	13,8	1306	1,306	+0,70	9,45
20	1,013	998,2	4,183	0,597	14,3	1004	1,006	1,82	7,03
30	1,013	995,7	4,174	0,612	14,7	801,5	0,805	3,21	5,45
40	1,013	992,2	4,174	0,627	15,1	653,3	0,659	3,87	4,36
50	1,013	988,1	4,174	0,640	15,5	549,4	0,556	4,49	3,59
60	1,013	983,1	4,179	0,650	15,8	469,9	0,478	5,11	3,03
70	1,013	977,8	4,187	0,662	16,1	406,1	0,415	5,70	5,28
80	1,013	971,8	4,195	0,669	16,3	355,1	0,365	6,32	2,23
90	1,013	965,3	4,208	0,676	16,5	314,9	0,326	6,95	1,97
100	1,013	958,4	4,220	0,684	16,8	282,5	0,295	7,52	1,75
110	1,43	951,0	4,233	0,685	17,0	259,0	0,272	8,08	1,60
120	1,93	943,1	4,250	0,686	17,1	237,4	0,252	8,64	1,47
130	2,70	934,8	4,265	0,686	17,3	217,8	0,233	9,19	1,35
140	3,61	926,1	4,287	0,685	17,2	201,1	0,217	9,72	1,26
150	4,76	917,0	4,313	0,684	17,3	186,4	0,203	10,3	1,17
160	6,18	907,4	4,346	0,681	17,8	173,6	0,191	10,7	1,10

Продовження дод. 6

I	:	2	:	3	:	4	:	5	:	6	:	7	:	8	:	9	:	10
170		7,92		897,2		4,380		0,676		17,2		162,8		0,181		11,3		1,05
180		10,03		886,9		4,417		0,672		17,2		153,0		0,173		11,9		1,03
190		12,55		876,0		4,459		0,664		17,2		144,2		0,165		12,6		0,965
200		15,55		863,0		4,505		0,658		17,0		136,4		0,158		13,3		0,932
210		19,08		852,8		4,555		0,649		16,7		130,5		0,153		14,1		0,915
220		23,20		840,3		4,614		0,640		16,5		124,6		0,148		14,8		0,898
230		27,98		827,3		4,681		0,629		16,3		119,7		0,145		15,9		0,888
240		33,48		813,6		4,76		0,617		16,0		114,8		0,141		16,8		0,883
250		39,78		799,0		4,87		0,605		15,5		109,0		0,137		18,1		0,884

Навчально-методичне видання

**ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ
ТА ВЕНТИЛЯЦІЯ**

Методичні рекомендації

до лабораторних робіт
для студентів спеціальності
192 - Будівництво та цивільна інженерія
(для всіх форм навчання)

Автори: Ломакін В.М., к.т.н., доцент

Кравченко В.І., к.т.н., доцент

Здано до тиражування _____. Підписано до друку _____.

Формат 60х84 1/16(A5). Папір газетний. Ум. друк. арк. 5,0. Тираж 50 прим. Зам.

№ ____/2020 р.

КДТУ, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8.

Тел.: 39-04-55