

Міністерство освіти і науки України

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва та транспорту

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

### **Методичні вказівки**

до лабораторного практикуму та виконання самостійних робіт з дисципліни  
«Енергоефективні технології в теплотехнічних процесах і установках»  
для здобувачів вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка» та ОПП «Енергетичний менеджмент»

“Ухвалено”  
на засіданні кафедри  
“Електротехнічні системи та  
енергетичний менеджмент”  
Протокол №1 від “31” серпня 2022р.

Кропивницький, 2022

«Енергоефективні технології в теплотехнічних процесах і установках»  
Лабораторний практикум та методичні вказівки до самостійних робіт для  
студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка» ОПП «Енергетичний менеджмент» / Укладачі: Клименко  
В.В., Савеленко І.В., Босий М.В. –Кропивницький : ЦНТУ, 2022, 69 с. - укр.  
мовою.

Укладачі: докт. техн. наук, професор Клименко В.В.,  
канд. техн. наук, доцент Савеленко І.В.,  
викладач Босий М.В.

Рецензент: канд. технічних наук, доцент Скрипник О.В.

## **Загальні положення**

Лабораторні роботи з курсу „Енергоефективні технології в теплотехнічних процесах і установках» виконуються паралельно з читання лекцій. Перед виконанням лабораторної роботи кожен студент повинен вивчити теоретичний матеріал за конспектом лекції, рекомендованою літературою і методичними вказівками, знати мету роботи, суть процесів, що вивчаються, порядок проведення роботи.

Кожен студент допускається до виконання лабораторних робіт тільки після ознайомлення з інструкцією з техніки безпеки. Реєстрація інструктажу фіксується у спеціальному журналі.

Для виконання кожної лабораторної роботи всі студенти повинні мати оформлені теоретичні положення і підготовлені для оформлення протоколи випробувань і розрахунків. До виконання лабораторної роботи допускаються студенти після перевірки викладачем теоретичних знань і порядку виконання роботи.

Звіти з лабораторних робіт оформлюються на окремих аркушах. Сторінки звіту нумеруються у такому порядку. Першою сторінкою вважається титульний лист, на якому номер не ставиться. Наступний аркуш повинен мати номер 2 і т. д. Номер аркушу ставиться у правому верхньому кутку без крапки, дефісів або інших знаків. На титульному аркуші зверху вказується міністерство, університет, кафедра. Посередині титульного аркуша приводиться назва звіту: лабораторна робота №\_\_ з дисципліни „Енергоефективні технології в теплотехнічних процесах і установках»; нижче вказується прізвище, ініціали і номер групи студента, а також вчене звання, прізвище та ініціали викладача. Внизу титульного аркушу вказується місто і рік, наприклад: „Кропивницький, 2022 р.”.

У звіті необхідно вказати назву лабораторної роботи, її мету, привести схему лабораторної установки, теоретичні відомості, протокол випробувань, результати розрахунків та самостійні висновки.

Лабораторна робота повинна бути захищена не пізніше наступного заняття.

## 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 наступні питання:

1. Фізичну суть процесу теплопровідності.

2. Основний закон теплопровідності і поняття про коефіцієнт теплопровідності.

### 1.1. 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):

$$\lambda = \frac{Q}{f \frac{\partial t}{\partial n}}, \quad (1.1)$$

де  $Q$  - потужність теплового потоку, Вт;  $f$  - площа, м<sup>2</sup>,  $\frac{\partial t}{\partial n}$  – 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 ( $\lambda = 20 \dots 418$  Вт/(м•К)).

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

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 наступним рівнянням, Вт:

$$Q = \frac{\pi \cdot l \cdot (t'_{cm} - t''_{cm})}{\frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}}, \quad (1.2)$$

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, °C.

З рівняння (1.2) можна знайти коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м\*K):

$$\lambda = \frac{Q \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi l (t'_{cm} - t''_{cm})}. \quad (1.3)$$

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

## 1.2. Експериментальна установка

Схема експериментальної установки зображена на рис.1.1.

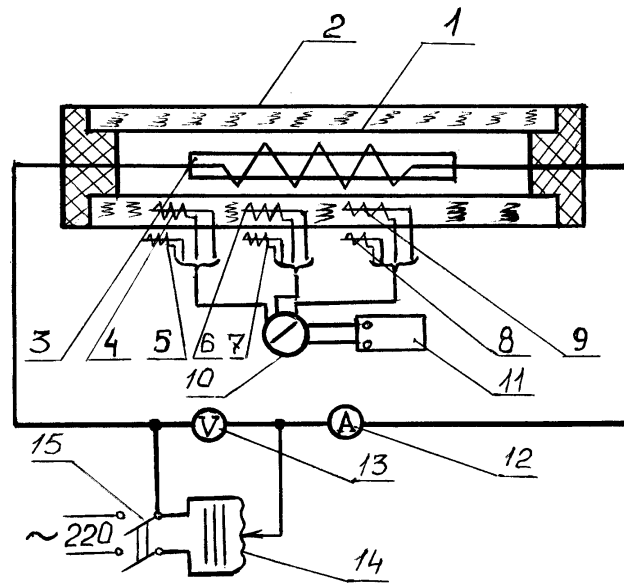


Рис. 1.1. Принципова схема установки для визначення коефіцієнта теплопровідності методом труби.

На стальну 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. Всередині 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.

### 1.3. 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 при даному режимі	Напруга $U, В$	Сила струму $I, А$	Температура на внутрішній поверхні ізоляції				Температура на зовнішній поверхні ізоляції			
			$t'_{cm}$	$t''_{cm}$	$t'''_{cm}$	$t'_{cp}$	$t'_{cm}$	$t''_{cm}$	$t'''_{cm}$	$t''_{cp}$
1										
2										
3										
4										

### 1.4. 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  $\lambda$  обчислюють за (1.3). Кількість теплоти  $Q$  визначають з потужності, що споживається електричними нагрівачами, Вт:

$$Q = U \cdot I \quad (1.4)$$

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

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

Визначення коефіцієнта теплопровідності металів і сплавів методом монотонного режиму за допомогою вимірювача ІТ-λ-400.

Принцип роботи вимірювача побудований за методом динамічного калориметра. Принципова схема вимірювальної комірки показана на рис. 6.2.

Випробуваний зразок 4, контактна пластина 3 і стержень 5 монотонно розігріваються тепловим потоком  $Q(\tau)$ , що надходить від основи 1. Стержень 5 і пластина 3 виготовлені з міді, що має високу теплопровідність, тому перепади температур на них незначні. Пластина 3, зразок 4 і стержень 5 знаходиться у адіабатній оболонці 6, яка виконана у вигляді нагрівачів і працює синхронно з джерелом  $Q(\tau)$  основи 1.

Тепловий потік  $Q(\tau)$ , що проходить крізь середній переріз пластини 2, частково поглинається нею і далі іде на розігрівання пластини 3, зразка 4 і стержня 5. Розміри системи вибрані таким чином, щоб потоки, акумульовані зразком і пластиною, були в 5 – 10 разів менші від тих, що поглинаються стрижнем.

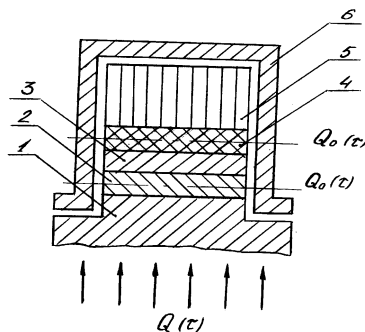


Рис. 1.2. Принципова схема вимірювальної комірки

В цьому випадку температурне поле зразка 4 і пластини 2 стає близьким до лінійного, стаціонарного, всі деталі системи розігріваються з близькими швидкостями, а для теплових потоків  $Q_o(\tau)$  і  $Q(\tau)$  справедливі рівняння:

$$Q_o(\tau) = \frac{\Delta t_o S}{R} = (0.5C_o + C_c) \vartheta, \quad (1.5)$$

$$Q_T(\tau) = \Delta t_T \cdot k_T = (0.5C_T + C_{II} + C_o + C_k) \vartheta, .$$

де  $\Delta t_o$ ,  $\Delta t_T$  – перепад температур відповідно на зразку і на пластині,  $K$ ;



$R$  – тепловий опір між стержнем і контактною пластинкою,  $\text{м}^2\text{К/Вт}$ ;

$$R = R_o + R_k, \quad (1.6)$$

де  $R_o$  – тепловий опір зразка,  $\text{м}^2\text{К/Вт}$ ;  $R_k$  – поправка, яка враховує тепловий опір контакту, неідентичність і тепловий опір заробки термопар,  $\text{м}^2\text{К/Вт}$ ;

$$R_o = \frac{h}{\lambda}, \quad (1.7)$$

де  $h$  – висота зразка, м;  $\lambda$  – теплопровідність зразка,  $\text{Вт/(м·К)}$ ;

$C_0 = C_0(t)m_0$  – повна теплоємність зразка, Дж/К;

$C_c = C_m(t)m_c$  – повна теплоємність стержня, Дж/К;

$C_0(t) = C_m(t)$  – питома теплоємність відповідно випробувального зразка і міді, Дж/(кг·К);  $m_0$ ,  $m_c$  – маси відповідно зразка і стержня, кг;  $C_m$ ,  $C_n$  – повні теплоємності пластин відповідно 2 і 3;  $v$  – швидкість розігріву вимірювальної комірки, К/с;  $S$  – площа поперечного перерізу зразка,  $\text{м}^2$ ;  $k_T^*$  – коефіцієнт пропорційності, що характеризує ефективну теплову провідність пластини 2, Вт/К.

На основі рівнянь (1.5) і (1.6) одержано рівняння для розрахунку теплового опору зразка:

$$R_o = \frac{\Delta t_o S (1 + \sigma_c)}{\Delta t_T K_T} - R_k, \quad (1.8)$$

де  $\sigma_c$  – поправка, що враховує теплоємність зразка,

$$\sigma_c = \frac{C_o}{2(C_o + C_c)}. \quad (1.9)$$

Величини  $C_c$ ,  $R_k$ ,  $K_m$  не залежать від властивостей випробуваного зразка і є сталими вимірювача (табл. 1.1)

Таблиця 1.1

Значення сталих вимірювача при різних температурах

$t, ^\circ\text{C}$	- 150	- 50	0	50	100	150	200
$C_c, \text{Дж/К}$	13,9132	14,7197	15,1633	15,8086	16,1312	16,3328	16,4538
$R_K, 10^{-6} \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$	439	300	371	391	423	455	433
$K_T, 10^{-2} \text{ Вт/К}$	11,73	12,42	11,44	11,63	11,72	11,43	11,78

Обчислення значення теплопровідності зразка необхідно віднести до середньої температури зразка

$$t = t_c + 0.5A_t n_o, \quad (1.10)$$

де  $t_c$  – температура, при якій вимірювали теплопровідність,  $^\circ\text{C}$ ;  $A_t$  – чутливість термопар хромель–алюмель,  $\text{К/мВ}$ ;  $n_o$  – різниця термоЕРС на зразку,  $\text{мВ}$ .

#### Коротке описання вимірювача ІТ– $\lambda$ –400

До складу установки входять: блок вимірювальний 1, блок живлення і регулювання 2, мікровольтамперметр (рис 1.3)

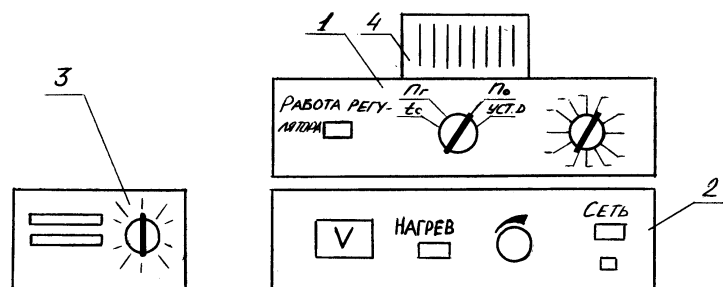


Рис.1.3. Зовнішній вигляд вимірювача

Вимірювальний блок призначений для визначення коефіцієнта теплопровідності досліджуваного матеріалу, що розміщується у спеціальній комірці з теплозахисною оболонкою 4. Для охолодження ядра вимірювальної комірки рідким азотом призначений бачок з теплоізованими стінками. На передній панелі вимірювача розташований перемикач В1, що має чотири положення:  $t_c$ ,  $n_o$ ,  $n_T$  і УСТ.0. В положенні УСТ.0 перевіряється механічний нуль

прилада Ф136. В положенні  $t_c$  потенціометром вимірюється температура стержня.

Блок живлення і регулювання забезпечує нагрівання ядра вимірювальної комірки з середньою швидкістю 0.1 К/с і автоматичне регулювання температури. Швидкість розігрівання визначається величиною початкової напруги на нагрівачі і швидкістю її зміни. Обидві ці величини суворо фіксовані. Для визначення теплопровідності у досліді в процесі безперервного розігрівання на фіксованих рівнях температури за допомогою приладу Ф136 вимірюється перепад температури у мікрівольтах (мкВ) на зразку  $n_0$  і пластині  $n_T$ .

На передній панелі встановлені: вольтметр, кнопки "Мережа" і "нагрівання", сигнальні лампи і рукоятка для встановлення початкової напруги, яка знімається з автотрансформатора. Повернення повзуна автотрансформатора у початковий стан здійснюється вручну поворотом рукоятки проти годинникової стрілки. При цьому необхідно відтягнути рукоятку на себе для розчеплення зубчатого приводу.

### 1.5. Підготовка до роботи

1. Перевірити наявність з'єднання: а) блока живлення і регулювання з вимірювальним блоком; б) приладу Ф136 з вимірювальним блоком.

2. Перевести кнопки МЕРЕЖА, НАГРІВ в положення ВИМК.

3. Підключити блок живлення і регулювання та прилад Ф136 до мережі 220 В 50Гц.

4. Встановити: перемикач ВИМІРЮВАННЯ в положення УСТ.0; перемикач ТЕМПЕРАТУРА в положення 25 С.

5. Підготувати прилад Ф136 до роботи, для чого натиснути кнопку МЕРЕЖА і АРР. За допомогою перемикача встановити необхідну границю вимірювальної величини і натиснути на одну з кнопок  $\mu V$ ,  $mV$ ,  $V$  в залежності від границі вимірювальної величини.

6. Виміряти висоту і діаметр зразка з точністю  $(\pm) 0.01$  мм і зважити зразок з точністю  $(\pm) 0.001$  г. Занести одержані результати в таблицю.

7. Підняти верхню половину корпуса вимірювальної комірки, протерти бензином і нанести тонкий шар мастила ПФМС–4 на контактні поверхні стержня, зразка, контактної пластини тепломіру.

8. Зразок встановити на контактну пластину тепломіра, стержень – на голки термопари.

9. Опустити верхню половину корпуса вимірювальної комірки.

10. Ввімкнути блок живлення і регулювання кнопкою МЕРЕЖА.

11. Установити за вольтметром початкову напругу 40 В при роботі від 25 °С і 20 В при роботі від – 100 °С.

### **1.6. Порядок проведення роботи**

1. Установити перемикач ВИМІРЮВАННЯ в положення  $t_c$ .

2. Включити кнопку НАГРІВ (основний нагрівач).

3. Зняти показання приладу Ф136  $n_0$  і  $n_T$  при досягненні кожного значення температури в табл. 6.2 (температура стержня досягає очікуваного значення при проходженні світлового покажчика прилада Ф136 через нульову позначку);

здійснивши перемикання рукояткою перемикача ВИМІРЮВАННЯ в положення  $n_0$   $n_T$ , занести значення  $n_0$  і  $n_T$  в табл. 6.2 і перевести перемикач ВИМІРЮВАННЯ в положення  $t_c$ .

4. Виключити кнопку НАГРІВ (основний нагрівач) при досягненні верхнього рівня температури випробувань.

5. Установити перемикач ВИМІРЮВАННЯ в положення УСТ.«О».

6. Зааретувати прилад Ф136.

7. Охолодити вимірювальну комірку до кімнатної температури. (Можна використати вентилятор).

8. Вимкнути блок живлення і регулювання.

## 1.7. Послідовність розрахунку

1. За допомогою табл. 1.2. перевести  $n_0$  і  $n_T$  у  $\Delta t_0$  і  $\Delta t_T$ .

Таблиця 1.2

Вимірювання коефіцієнта теплопровідності

$d =$  м,  $h =$  м,  $m =$  кг.

Величина	Температура, °C						
	-100	-50	0	50	100	150	200
1	2	3	4	5	6	7	8
$t_c, ^\circ\text{C}$							
$n_0, \text{мкВ}$							
$n_T, \text{мкВ}$							
$\Delta t_0, ^\circ\text{C}$							
$\Delta t_T, ^\circ\text{C}$							
$C_0, \text{кДж/К}$							
$\sigma_c, \text{кДж/К}$							
$R_0, \text{м}^*\text{К/Вт}$							
$\lambda, \text{Вт/(м}^*\text{К)}$							
$\bar{t}_c, ^\circ\text{C}$							

2. Розрахувати поправку на теплоємність зразка  $\sigma$  за (1.9), тепловий опір зразка  $R_0$  – за (1.8), теплопровідність випробуваного зразка  $\lambda$  – за (1.7) і температуру віднесення виміряного значення теплопровідності  $\bar{t}$  – за (1.10).

3. Побудувати залежність  $\lambda = f(\bar{t})$ .

### 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?

## ТЕПЛОВІДДАЧА ЦИЛІНДРИЧНОЇ ТРУБИ ПРИ ПРИРОДНІЙ КОНВЕКЦІЇ

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

### 2.1. 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:

$$Q = \alpha f_1 (t_{cm} - t_{pid}), \quad (2.1)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>•К);

$t_{cm}, t_{pid}$  – температура відповідно стінки і навколишнього середовища, °С;

$f_1$  – площа поверхні, м<sup>2</sup>.

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією враховує контактні умови тепловіддачі. Згідно з рівнянням (2.1):

$$\alpha_k = \frac{Q_k}{f_1 (t_{cm} - t_{pid})}, \text{ при } t_{cm} > t_{pid},$$

або (2.2)

$$\alpha_k = \frac{Q_k}{f_1 (t_{pid} - t_{cm})}, \text{ при } t_{cm} < t_{pid}.$$

З рівняння (2.2) 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  $\alpha_k$ , 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  $\Delta t = t_{cm} - t_{pid}$ , 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  $Q_l$ . Таким чином:

$$Q = Q_k + Q_l, \quad (2.3)$$

Променевий тепловий потік розраховується за допомогою рівняння, Вт:

$$Q_{np} = C f_1 \left[ \left( \frac{T_{cm}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{pid}}{100} \right)^4 \right], \quad (2.4)$$

де  $C = C_0 \cdot \varepsilon_{np}$  – коефіцієнт випромінювання, Вт/(м<sup>2</sup>•К<sup>4</sup>);  $C_0 = 5.67$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/(м<sup>2</sup> К<sup>4</sup>);  $T_{cm}$ ,  $T_{pid}$  – абсолютні температури, відповідно, стінки і рухомого середовища, К;  $\varepsilon_{np}$  – приведений ступінь чорноти.

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{f_1}{f_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}, \quad (2.5)$$

де  $f_1, f_2$  – площі відносно тепловіддаючої поверхні і огорожуючих стін, м<sup>2</sup>. 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  $t = 40 \dots 370$  °C, алюміній шорсткий має  $\varepsilon = 0.11 \dots 0.19$  при  $t = 200 \dots 600$  °C.

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

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 диференціальних 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:

$$Nu = f(Gr, Pr), \quad (2.6)$$

де  $Nu$  – безрозмірний критерій тепловіддачі Нуссельта;  $Gr$  – критерій Грасгофа – критерій, який характеризує співвідношення підйомної сили, що виникає внаслідок різниці густини рідини і сили молекулярного тертя;  $Pr$  – критерій Прандтля, який характеризує фізичні властивості рідини, визначаються за формулами:

$$Nu = \alpha l / \lambda, \quad (2.7)$$

$$Gr = \frac{g \beta l^3 \Delta t}{\nu^2}, \quad (2.8)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (2.9)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup> К);  $l$  – характерний розмір, м;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м<sup>2</sup> К);  $\beta = \frac{1}{T_{pid}}$  – коефіцієнт об'ємного розширення, 1/К;  $\Delta t$  – різниця температур, К;  $\nu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м<sup>2</sup>/с;  $a = \frac{\lambda}{C_p \rho}$  – коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с;  $C_p$  – питома теплоємність, Дж/(кг К);  $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>.

При направленому русі рідини:

$$Nu = f(Re, Pr)$$

де  $Re$  – критерій Рейнольдса:

$$Re = \frac{wl}{\nu}, \quad (2.10)$$

Цей критерій являє собою відношення сил інерції до сил в'язкого тертя і за величиною його значення визначається характер режиму руху рідини: ламінарний ( $Re \leq 2300$ ), турбулентний, перехідний.

Залежність між критеріями встановлюється дослідним шляхом. В (2.6) визначеному числовому значенню кожного критерія відповідає нечислове значення кожного з параметрів (наприклад, для критерія Грасгофа –  $T, l, \nu$ ). Але кожному значенню параметра відповідає конкретний випадок. Отже, рішення у формі (2.6) справедливе для незчисленної кількості тих поодиноких випадків, у яких однакові критерії Грасгофа і Прандтля, тому воно носить узагальнений характер.

На основі рівняння (2.6) можна визначити значення числа Нуссельта, а отже, відповідне значення коефіцієнта тепловіддачі:

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{l}. \quad (2.11)$$

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

$$\alpha = C_1(\Delta t)^n \quad (2.12)$$

Формула (2.12) – 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:

$$Nu = C(Gr Pr)^n, \quad (2.13)$$

де  $C, n$  – дослідні коефіцієнти.

Узагальнена залежність (2.13) дозволяє встановити, як впливає на коефіцієнт тепловіддачі такі величини, як геометричний розмір системи  $l$ , коефіцієнт в'язкості  $\nu$  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  $10^3 < GrPr < 10^9$ :

$$Nu_{pid} = 0.5(Gr_{pid} Pr_{pid})^{0.25} \left( \frac{Pr_{pid}}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}, \quad (2.14)$$

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

$$Nu_{pid} = 0.5(Gr_{pid} Pr_{pid})^{0.25} \left( \frac{Pr_{pid}}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}, \quad (2.15)$$

при  $Gr \cdot Pr > 6 \cdot 10^{10}$

$$Nu_{pid} = 0.5(Gr_{pid} Pr_{pid})^{0.33} \left( \frac{Pr_{pid}}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}, \quad (2.16)$$

В цих рівняннях за визначальну температуру приймається температура рідини віддалік від поверхні, індекси "рід" і "ст" означають, що числа подібності визначаються відповідно при визначальній температурі рідини  $t_{pid}$  і температурі поверхні  $t_{cm}$ .

Для газів  $Pr = const$ , а  $\frac{Pr_{pid}}{Pr_{cm}} = 1$  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. Міхєєва:

$$Nu = C(Gr_c Pr_c)^n, \quad (2.17)$$

Значення коефіцієнтів  $C$  і  $n$  наведені в табл. 2.1:

Таблиця 2.1

Значення сталих  $C$  і  $n$

$(Gr_c \cdot Pr_c \cdot c)$	$C$	$n$
$0 \dots 1 \cdot 10^{-3}$	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  $\lambda$ ,  $\nu$ ,  $Pr$  для повітря, що входять у склад чисел подібності, визначають по середній температурі граничного шару (табл. 2.2):

$$t_c = 0.5(t_{cm} + t_{pid}).$$

Таблиця 2.2

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

$t, ^\circ C$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$C_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$a \cdot 10^6, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\mu \cdot 10^6, \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$	$\nu \cdot 10^6, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$Pr$
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
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

## 2.2. Лабораторна установка

Досліди по визначенню коефіцієнта тепловіддачі при вільній конвекції проводяться на лабораторній установці (рис.2.1), яка складається з циліндричної труби  $\varnothing 80$  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.

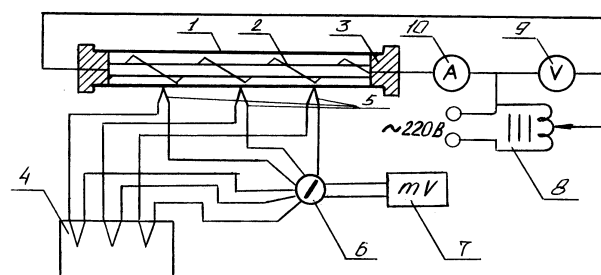


Рис . 2.1 Схема установки для дослідження теплообміну при природній конвекції

## 2.3. Порядок проведення роботи

Обмеженість часу при проведенні лабораторного заняття не дозволяє провести експерименти, які встановлюють залежність (2.8) 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
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Сила струму	$I$	А									
Напруга	$U$	В									
Термо ЕРС	$E$	МВ									

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Термопара 1											
Термопара 2											
Термопара 3											
Температура навколишнього середовища	$t_{pid}$	°C									

## 2.4. Обробка результатів вимірювань

1. Обчислити для кожного досліду середні значення термоЕРС:

$$E = \frac{(E_1 + E_2 + E_3)}{n}, \quad (2.18)$$

де  $n$  – число вимірювань.

2. Обчислити по таблиці значення температур.

3. Розрахувати загальну електричну потужність, яка дорівнює тепловому потоку:

$$Q = IU \cos \varphi. \quad (2.19)$$

4. Розрахувати променевий тепловий потік за формулою (2.4).

5. Визначити конвективний тепловий потік за формулою (2.3).

6. Розрахувати  $\alpha_k$  за формулою (2.2).

7. Для порівняння розрахувати  $\alpha$  критеріальним методом, для чого

- по визначальній температурі з табл.2.2 знайти значення фізичних параметрів повітря ( $\lambda$ ,  $\nu$ ,  $Pr$ );
- обчислити критерій Грасгофа і добуток  $GrPr$ ;
- вибрати одну із розрахункових формул (2.12) – (2.15) з урахуванням визначальної температури і добутку  $GrPr$ ;
- розрахувати критерій Нуссельта і за формулою цього критерія – коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_k$ ;
- порівняти розрахунковий коефіцієнт тепловіддачі з дослідним. Розбіжність

не повинна перевищувати  $\pm 25\%$ .

### 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	(2.19)			
Ступінь чорноти	$\varepsilon$	–				
Площа поверхні труби	$f$	м <sup>2</sup>				
Середня термоЕРС	$E_{cp}$	мВ	(2.18)			
Температура поверхні	$t_{cm}$	°С	табл. 1.2			
Потужність променистого потоку	$Q_{np}$	Вт	(2.4)			
Потужність конвективного потоку	$Q_k$	Вт	(2.3)			
Дослідний коефіцієнт тепловіддачі	$\alpha_k$	Вт/(м <sup>2</sup> К)	(2.2)			
Визначальна температура	$t_{pid}$ $t_{cm}$					
Коефіцієнт теплопровідності	$\lambda$		В.2			
Коефіцієнт кінематичної в'язкості	$\nu$	м <sup>2</sup> /с				
Критерій Прандтля	$Pr$					
Критерій Грасгофа	$Gr$		(2.8)			
Добуток	$GrPr$					
Коефіцієнти:	$C$		(2.14) – (2.16)			
	$n$		або табл. 2.1			
Критерій Нуссельта	$Nu$		(2.13)			
Розрахунковий коефіцієнт тепловіддачі	$\alpha_{кр}$	Вт/(м <sup>2</sup> К)	(2.11)			
Розходження			$\Delta = \frac{\alpha_k - \alpha_{кр}}{\alpha_k} \cdot 100\% < 25\%$			

### Контрольні запитання:

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?

### Лабораторна робота №3

## ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОВІДДАЧІ ТРУБ РІЗНОГО ДІАМЕТРУ ПРИ ВІЛЬНІЙ КОНВЕКЦІЇ

Мета роботи: експериментально визначити коефіцієнт тепловіддачі при вільній конвекції для горизонтально розташованих труб різного діаметра; вивчити методику обробки експериментальних даних, визначити коефіцієнта тепловіддачі конвекцією за допомогою критеріальних рівнянь, порівняти результати теоретичних розрахунків та експерименту.

### 3.1. Загальні відомості

**Експериментальний метод визначення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією.** В цій роботі потрібно визначити експериментально залежність коефіцієнта тепловіддачі конвекцією від різниці температур  $\Delta t = t_c - t_p$ , і діаметра, тобто  $\alpha_k = f(\Delta t, d)$ . Для цього необхідно знати величину конвективного теплового потоку  $Q_k$  (2.4), променевий тепловий потік (2.4).

Але недоліком даного методу визначення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією є те, що результати експерименту можна використовувати тільки для умов проведення експерименту (діаметр, довжина, середовище, температури та ін.).

### **Розрахунковий метод визначення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією.**

Теоретично 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 коефіцієнт тепловіддачі визначають експериментальним шляхом. Але розповсюдження результату одиночного дослідження на інші конкретні випадки приводить до грубих помилок, внаслідок складної залежності коефіцієнта тепловіддачі від багатьох факторів.

Об'єднання обох цих методів (теоретичного і експериментального) за допомогою теорії подібності дозволяє узагальнити результати одиничних дослідів на цілу групу подібних явищ даного класу, які якісно однакові і аналітично описуються однаковими рівняннями. Наприклад: теплопровідність, конвекція та ін. На основі диференціальних рівнянь за допомогою теорії подібності фізичні змінні величини можна об'єднати у безрозмірні комплекси або критерії подібності. У цьому полягає сутність першої теореми подібності.

Наприклад, безрозмірний критерій тепловіддачі Нуссельта: критерій Грасгофа, критерій Рейнольдса та критерій Прандтля, які можна розрахувати за формулами (2.7)-(2.10).

Якщо експеримент проводиться з повітрям, число Прандтля незначно залежить від температури і рівняння (2.9) можна подати у виді:

$$Nu = C_1 Gr^n. \quad (3.1)$$

Логарифмуючи рівняння (3.1), маємо:

$$\ln Nu = \ln C_1 + n \ln Gr.$$

Позначивши  $\ln Nu = Y$ ;  $\ln Gr = x$ ;  $\ln C_1 = A$

$$Y = A + nx.$$

Це рівняння є рівнянням прямої лінії (рис.3.1). Показник степені  $n$  являє собою тангенс кута нахилу прямої до осі абсцис. Отже значення  $n$  можна визначити за допомогою графічного надання дослідних даних у координатах  $\ln Nu = f_1(\ln Gr)$ .

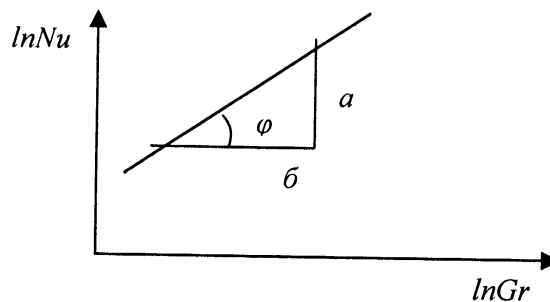


Рис. 3.1. До встановлення залежності виду  $Nu = C_1 Gr^n$ .

Показник степеня:

$$n = \operatorname{tg} \varphi = a / b. \quad (3.2)$$

Стала „ $C$ ” визначається з рівняння

$$C = Nu / Gr^n, \quad (3.3)$$

яке задовольняє будь-яка точка прямої.

### 3.2. Лабораторна установка

Досліди по визначенню коефіцієнта тепловіддачі при вільній конвекції проводяться на лабораторній установці (рис.3.2), яка складається з циліндричних труб діаметром 30, 20 та 10 мм і довжиною 500 мм. У середині труби встановлено електричний нагрівач 2, потужність яких регулюється ЛАТРОм 8. Споживана потужність визначається за допомогою показань амперметра 10 і вольтметра 9. З обох кінців труби закриті дисками 3, які виготовлені з теплоізоляційного матеріалу і призначені для зменшення теплових втрат крізь торці. Температура на поверхнях труб вимірюється термопарами 5, холодні спаї яких виведені у коробку 4. Термопари через перемикач 6 підключені до потенціометра 7, який

вимірює термоЕРС, за якою за допомогою таблиці визначається температура.

### 3.3. Порядок проведення роботи

Для кожної трубки необхідно встановити залежність відповідно рівнянню (2.12), для чого за допомогою ЛАТРа змінюється теплова потужність.

1. Ввімкнути установку і за допомогою ЛАТРа встановити мінімальний режим нагрівання.
2. Домогтися стаціонарного стану тепловіддачі, який характеризується постійними 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 термоЕРС декілька разів з інтервалом 5–10 хвилин.
4. Змінити температурний режим. Для цього збільшити витрату електроенергії. При досягненні стаціонарного режиму записати показання приладів.
5. Повторити режими нагріву два-три рази, збільшивши потужність.
6. Режим руху повітря біля стінок труб повинен бути стаціонарним, тому при проведенні дослідів двері і вікна лабораторії повинні бути закритими для запобігання руху повітря.
7. Після закінчення дослідів (5-6 режимів) необхідно вимкнути установку із мережі.

Результати вимірювань заносяться у протокол.

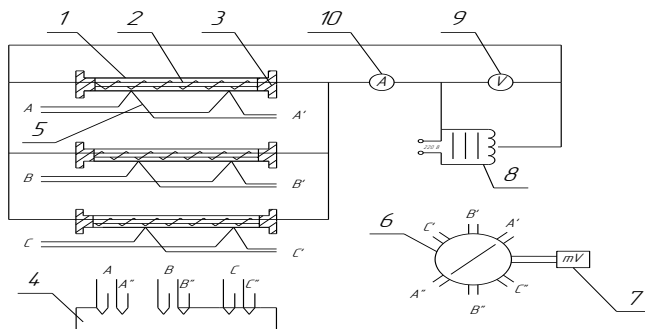


Рис. 3.2. Схема установки для дослідження теплообміну вільної конвекції від горизонтально розташованих труб різного діаметру

## Протокол вимірювань

Параметр	Позна чення	Одиниця	Трубка Ø						Трубка Ø						Трубка Ø					
			Вимірювання																	
			Режими нагрівання																	
			1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Струм	<i>I</i>	А																		
Напруга	<i>U</i>	В																		
Термопари : № 1 № 2	<i>E</i>	мВ																		
Температура навколишнього середовища	<i>t</i>	°С																		

### 3.4. Обробка результатів вимірювань

1. Обчислити для кожного режиму нагріву середнє значення термоЕРС:

$$E = \frac{E_1 + E_2}{2}, \quad (3.4)$$

2. Визначити за таблицею значення температур  $\Delta t = t_c - t_{нов}$ .
3. Розрахувати загальну електричну потужність, яка дорівнює тепловому потоку:

$$Q = I \cdot U \cos \varphi \quad (3.5)$$

4. Розрахувати променевий тепловий потік за формулою (2.4).
5. Визначити конвективний тепловий потік за формулою (2.3).
6. Розрахувати коефіцієнт тепловіддачі конвекцією за формулою (2.2).
7. За температурою повітря  $t_{нов}$  (визначальна температура) з табл. 3.2 визначити теплофізичні величини  $\lambda$ ,  $\nu$ ,  $Pr$ .
8. Розрахувати критерій Нуссельта за формулою (2.7) та критерій Грасгофа за формулою (2.8).
9. Для кожної труби побудувати графік (рис.3. 1).
10. За допомогою графіка визначити показники степені.
11. Визначити для отриманих показників степені  $n$  коефіцієнти  $C_l$  за формулою (3.3).
12. Порівняти визначені коефіцієнти  $n$  та  $C_l$  з коефіцієнтами формули

(3.4), зробити висновки.

#### Протокол обчислень

Величина	Позна- чення	Одиниця вимірюв.	Форм ула	Трубка а $d = 10$	Трубка $d = 20$	Трубка $d = 30$
1	2	3	4	5	6	7
Струм	$I$	$A$	-			
Напруга	$U$	$V$	-			
$\cos \varphi$	-	-	-	0,90...0,95		
Потужність теплового потоку	$Q$	$Вт$	(2.3)			
Ступінь чорноти	$E$	-				
Площа труби	$F$	$м^2$				
Середня термоЕРС	$E_{cp}$	$мВ$	(2.18)			
Різниця температур	$\Delta t$	$^{\circ}C$	$t_{cm} - t_{pid}$			
Температура стінки	$t_c$	$^{\circ}C$				
Потужність променевого потоку	$Q_{np}$	$Вт$	(2.4)			
Потужність конвективного потоку	$Q_k$	$Вт$	(2.3)			
Дослідний коефіцієнт тепловіддачі	$\alpha_k$	$\frac{Вт}{м^2 K}$	(2.2)			
Визначальна температура	$t_{нов}$	$^{\circ}C$				
Визначальний геометричний розмір	$L$	$м$				
Коефіцієнт теплопровідності	$\lambda$	$\frac{Вт}{м K}$				

Величина	Позна- чення	Одиниця вимірюв.	Форм ула	Трубка а $d = 10$	Трубка $d = 20$	Трубка $d = 30$
Коефіцієнт кінематичної в'язкості	$N$	$\frac{м^2}{с}$				
Критерій Прандтля	$Pr$	-				
Критерій Нуссельта	$Nu$	-				
Критерій Грасгофа	$Gr$	-				
Добуток $Gr \cdot Pr$		-				
Коефіцієнти: дослідний	$C_l$	-				
	$n$	-				
теоретичний	$C$	-				
	$\Pi$	-				
Коефіцієнт тепловіддачі розрахунковий	$\alpha_k$	$\frac{Вт}{м^2 K}$				

#### Контрольні запитання:

1. Що називається конвективним теплообміном?
2. Види конвекції і як їх розрізняють?
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. Що таке критеріальне рівняння?
10. Що таке критерії подібності?
11. Запишіть рівняння закону Стефана–Больцмана для сірого тіла.
12. Що таке абсолютно чорне тіло і ступінь чорноти?
13. Які фізичні явища називаються подібними?
14. Як записується критеріальне рівняння у загальному виді для вільної конвекції?

#### Лабораторна робота №4

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВІДДАЧІ ПРИ КИПІННІ ВОДИ

Мета роботи: вивчення методики експериментального визначення коефіцієнта тепловіддачі при кипінні води.

#### 4.1. Загальні положення

У цій роботі досліджується вплив температурного натиску на інтенсивність тепловіддачі від поверхні, що гріє, до води при кипінні, в умовах атмосферного тиску. Розрізняють кипіння рідини на твердій поверхні теплообміну, при підводі до неї теплоти ззовні і кипіння в об'ємі рідини.

Для виникнення процесу кипіння необхідна наявність двох умов: перегрів рідини відносно температури насичення і наявність центрів пароутворення. Перегрів рідини  $\Delta t = t_c - t_n$  у більшій степені спостерігається на поверхні теплообміну, де температура рідини змінюється від температури стінки  $t_c$  до температури, яка набагато перевищує температуру насичення  $t_n$ , при даному

тиску. Центрами пароутворення є бульбашки повітря, газів, що розчинені у рідині, а також елементи шорсткості поверхні, пилинки і т.д. Кипіння протікає з утворенням парових бульбашок біля центрів пароутворення.

Механізм теплообміну при бульбашковому режимі кипіння відрізняється від механізму тепловіддачі при конвекції однофазної рідини наявністю додаткового перенесення маси речовини і теплоти бульбашками із суміжного шару в об'єм киплячої рідини. Це призводить до високої інтенсивності тепловіддачі при кипінні у порівнянні з конвекцією однофазної рідини.

Тепловіддача і гідродинаміка двофазного потоку при кипінні у великому об'ємі визначається температурним напором, поширеністю теплового потоку, тиском, теплофізичними властивостями рідини (теплопровідність, в'язкість та ін.). Залежність щільності теплового потоку  $q$  і коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  від температурного напору  $\Delta t$  наведена на рис.4.1.

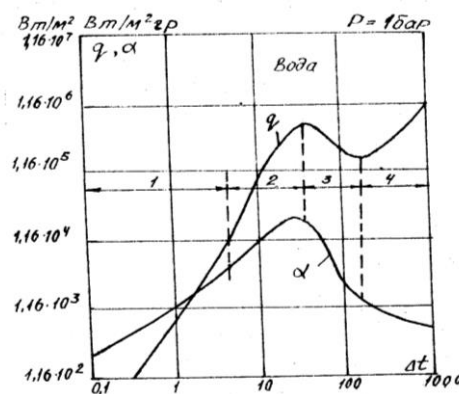


Рис.4.1. Залежність щільності теплового потоку  $q$  і коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  від температурного напору  $\Delta t$ . 1- конвективна ділянка; 2- ділянка бульбашкового(ядерного) кипіння; 3- перехід бульбашкового кипіння у плівковий; 4- ділянка плівкового кипіння.

При ядерному кипінні основний потік тепла від стінки передається до рідкої фази, тому тепловий опір при кипінні із збільшенням  $\Delta t$  утворення бульбашок пари і їх відрив зростають, а спливання викликає турбулізацію рідини, що руйнує суміжний шар і значно підвищує коефіцієнт тепловіддачі від нагрітої поверхні до рідини.



Зростання теплового потоку збільшує перегрів рідини, що призводить до зливання окремих бульбашок(ядер) і утворенню біля стінки суцільної парової плівки, яка відділяє рідину від поверхні нагріву. При цьому відбувається різке падіння коефіцієнта тепловіддачі із-за малої теплопровідності парової плівки. Зі збільшенням товщини плівки вона набуває стійкіший характер. Коефіцієнт тепловіддачі у цьому випадку зберігається майже постійним, що мало залежить від теплового потоку.

## 4.2. Методика проведення експерименту

Проведення експерименту виконується на лабораторному пристрої, принципова схема якого наведена на рис.4.2.

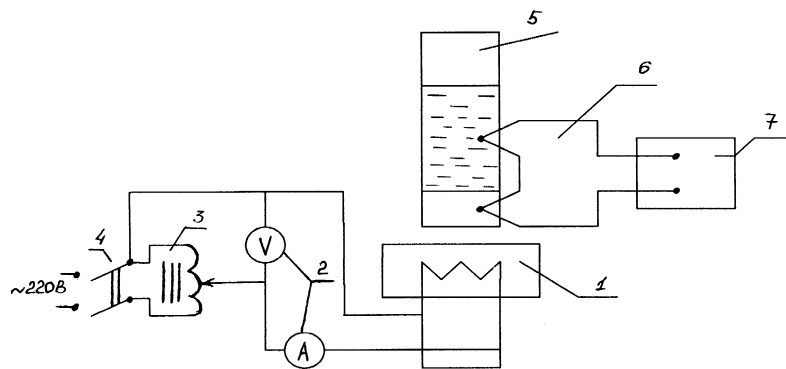


Рис.4.2.Принципова схема пристрою для визначення залежності щільності теплового потоку  $q$  і коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  від температурного напору  $\Delta t$ . 1-нагрівач; 2- вольтметр, амперметр; 3- ЛАТР; 4- перемикач; 5- ємність для нагрівання води; 6- диференціальна термопара; 7- потенціометр.

У посудині 5(діаметром  $d_g = 100\text{мм}$ ) знаходиться дистильована вода, яка нагрівається від нагрівача 1. Диференціальна термопара має один спай на поверхні нагрівача, а другий знаходиться у рідині. За допомогою потенціометра вимірюється термоЕРС, яка відповідає температурному напору  $\Delta t$ . Навантаження на нагрівач встановлюється ЛАТРОм 3 і вимірюється амперметром і вольтметром 2 або ватметром.

### Досліди виконуються в наступному порядку:

1. Наповнити посудину дистильованою водою, приблизно на 0,5 висоти.
2. Увімкнути електронагрівач у мережу і встановити мінімальну потужність.
3. Після вмикання нагрівача виконується постійний нагляд за показами потенціометра. При досягненні постійного значення термоЕРС  $\Delta E$ , фіксуються значення  $Q$  та  $\Delta E$ .
4. Збільшувати значення потужності(поступово для кожного значення) і продовжувати спостерігати за зростанням  $\Delta E$  до постійного значення, що фіксується у протоколі.
5. Після нагріву води до температури кипіння збільшувати потужність і вести нагляд за зміною  $\Delta E$ .

#### Протокол досліду

Величина	Позначення	Розмірність	Дослід					
			1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сила струму	$I$	А						
Напруга	$V$	В						
Потужність теплового потоку	$Q$	Вт						
ТермоЕРС	$\Delta E$	мВ						
Температурне напірання	$\Delta t$	К						
Щільність теплового потоку	$q$	Вт/м <sup>2</sup>						
Коефіцієнт тепловіддачі	$\alpha$	Вт/м <sup>2</sup> К						
Розрахунковий коефіцієнт	$\alpha_p$	Вт/м <sup>2</sup> К						
Розбіжність	$\Delta$	%						

#### Методика обробки дослідних даних:

1. Результати дослідів подаються у вигляді таблиці і графіків  $\alpha = f(\Delta t)$ ,  $q = \varphi(\Delta t)$ .
2. Температурний напір визначається за допомогою таблиці переведення термоЕРС у градуси в залежності від виду термопари(ТХА або ТХК).
3. Середній коефіцієнт тепловіддачі розраховується за формулою:

$$\alpha = \frac{Q}{\Delta t \cdot F}, \text{ Вт/м}^2\text{К},$$

де  $F$  - площа поверхні дна посудини, м<sup>2</sup>.

4. Для даної рідини коефіцієнт  $\alpha$  при розвиненому кипінні залежить тільки від щільності потоку  $q$  і тиску  $P$ . Наприклад, для води у діапазоні тиску від 1 до 40 бар можливе використання й такої формули для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі:

$$\alpha = 3,14 \cdot q^{0,7} \cdot P^{0,15}, \text{ Вт/м}^2\text{К}.$$

Тому, для зони кипіння (для дослідних значень  $\Delta t$ ) розрахувати  $\alpha$  і порівняти з дослідними результатами.

### **Контрольні запитання:**

1. За яких умов виникають процеси кипіння і конденсації пари?
2. Де утворюються бульбашки пари?
3. Яке кипіння називають бульбашковим, а яке - плівковим?
4. Що таке критичний момент кипіння?
5. Які рівняння рекомендуються для визначення коефіцієнта тепловіддачі при бульбашковому кипінні?
6. Як і чому коефіцієнт тепловіддачі при плівковому режимі залежить від температурного напору?

### **Лабораторна робота №5**

#### **ДОСЛІДЖЕННЯ ВОДОВОДЯНОГО ТЕПЛООБМІННИКА**

Мета роботи: ознайомитися з призначенням і конструкціями теплообмінників; визначити коефіцієнт тепловіддачі водоводяного підігрівача, що працює за схемами прямого та протитоку; установити залежність коефіцієнта теплопередачі від швидкості руху теплоносія.

### 5.1. Загальні теоретичні відомості

Пристрої, призначені для передачі теплоти від одного теплоносія до іншого, називається теплообмінниками. Якщо теплообмін між теплоносіями здійснюється безперервно і через роздільну стінку (поверхню теплообміну), такі теплообмінники називаються рекуперативними або теплообмінниками безперервної дії. Якщо гаряча і холодна середовищі рухаються паралельно і в одному напрямку, така схема руху називається прямотоком; якщо рідини протікають паралельно, але у протилежному напрямку – протиток.

Грійне і нагрівне середовища можуть мати різні фізичні властивості, агрегатний стан, температуру, тиск і швидкість руху. Сама поверхня теплообміну також може розрізнятися за розмірами, формою і компоновкою, тому інтенсивність переносу теплоти буде різною.

Інтенсивність переносу теплоти (теплопередача) характеризується коефіцієнтом теплопередачі, який визначається з рівняння, Вт/(м²•К):

$$k = \frac{Q}{f \Delta t}, \quad (5.1)$$

де  $Q$  – кількість теплоти, що передається одним теплоносієм іншому, Вт;  $f$  – площа поверхні теплообміну, м²;  $\Delta t$  – середній температурний напір, °С.

Циліндричні поверхні у теплообмінниках прийнято характеризувати коефіцієнтом теплопередачі, віднесеним до 1 м довжини труби, тобто лінійним коефіцієнтом теплопередачі  $k_l$ , який при усталеному тепловому стані визначають за формулою, Вт/(м•К):

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\pi} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}. \quad (5.2)$$

Коефіцієнт теплопередачі для плоскої поверхні визначається за формулою, Вт/(м²•К):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (5.3)$$

де  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  – коефіцієнти тепловіддачі відповідно на гарячому і холодному боці;  $d_1$  і  $d_2$  – відповідно внутрішній і зовнішній діаметр труби, м;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності стінки, Вт/(м•К);  $\delta$  – товщина стінки, м.

Середній температурний напір по всій поверхні теплообміну:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\mathcal{M}}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\mathcal{M}}}}, \quad (5.4)$$

де  $\Delta t_{\delta}$  – температурний напір (різниця температур обох теплоносіїв) на тому кінці поверхні теплообміну, де він більше (рис.5.1);  $\Delta t_{\mathcal{M}}$  – температурний напір на другому кінці поверхні теплообміну, де він менше.

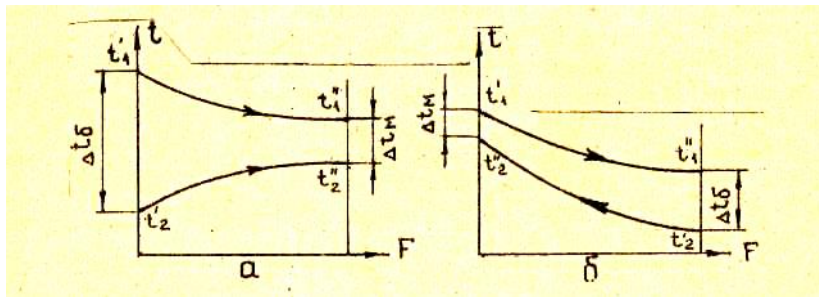


Рис.5.1. Характер зміни температур робочих середовищ при прямотоку (а) та протитоку (б)

Кількість теплоти, що передано гарячим і сприйняте холодним середовищем, визначається за наступним рівнянням теплового балансу, Вт:

$$Q = G_1 C_{p1}(t_1' - t_1'') = G_2 C_{p2}(t_2'' - t_2') + \Delta Q, \quad (5.5)$$

де  $G_1$  і  $G_2$  – масова витрата відповідно гарячого і холодного середовища, кг/с;  $C_{p1}$ ,  $C_{p2}$  – масові ізобарні теплоємності, кДж/(кг•К);  $t_1'$  і  $t_1''$  – температура гарячого середовища на вході і виході з теплообмінника, °С;  $t_2'$  і  $t_2''$  – те ж, для холодного середовища, °С.

## 5.2. Лабораторна установка

Експерименти виконуються на лабораторній установці (рис.5.2), що виконана у вигляді водоводяного теплообмінника 10, який складається з двох труб, вміщених одна в другу.

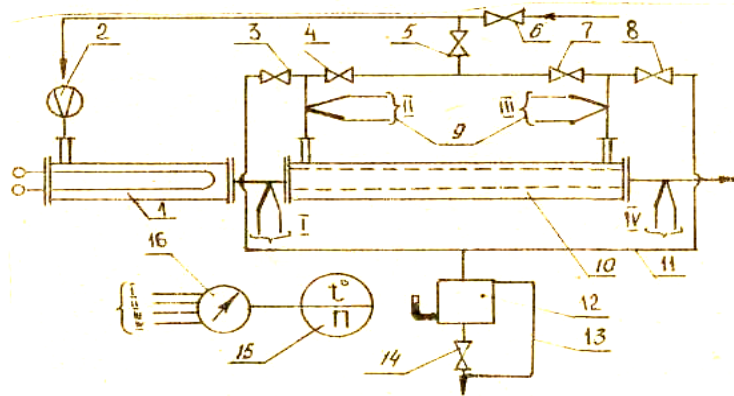


Рис. 5.2. Схема установки по випробуванню водоводяного теплообмінника

Теплоносієм для нього є гаряча вода, яка нагрівається в електричному підігрівнику 1. Гаряча вода надходить до внутрішньої труби теплообмінника 10. Холодна водопровідна вода нагрівається у просторі між трубками теплообмінника, стікає у зливний трубопровід 11 і далі відводиться у каналізацію. При роботі установки за прямоточною схемою руху теплоносіїв відкривають вентилі 4, 8, 14, а при протитоковій – 3, 7, 14. для контролю витрати гарячої і холодної води встановлені витратоміри 2 і 12. Масова витрата теплоносія вимірюється за допомогою баку 12, який має водомірне скло із тарированою шкалою і секундомір. Установка обладнана датчиками 9 для вимірювання температури гарячого і холодного теплоносіїв, які підключені через перемикач 16 до потенціометра 15.

## 5.3. Порядок проведення роботи

При випробуванні установки при прямотоку виконуються наступні операції:

1. Відкрити вентиль 6 на трубопроводі холодної води, що надходить до теплообмінника 10 і водопідігрівач 1, а також вентиль 14 на зливному трубопроводі гарячої води.

2. Відкрити послідовно вентилі 4, 5 і 8, а 3 і 7 – закрити.

3. Включити у мережу електричний підігрівач 1. Прогріти установку до одержання усталеного режиму, що характеризується сталістю у часі температур первинного і вторинного теплоносіїв. При цьому температура гарячої води після електричного водонагрівача (на вході до теплообмінника 10) повинна бути не більше 90-95 °С.

4. Закрити вентиль 14 на вході з мірного баку і коли рівень води досягне нульової відмітки шкали водомірного скла, включити секундомір. З цього моменту необхідно уважно слідкувати за показом приладів, що вимірюють температуру, і заповненням баку.

5. Коли рівень води дійде до певної мітки на шкалі водомірного скла, секундомір виключити і відкрити кран 13 для спуску води з баку.

6. Записати покази всіх приладів, які вимірюють температуру, витрату води і час, у протокол спостережень.

7. Повторити досліди, змінивши витрату води на водоводяний теплообмінник за допомогою вентиля 5. записати покази приладів. На кожному режимі повторити досліди не менше 3 разів.

При проведенні випробування установки на протитоку послідовно виконуються наступні операції:

1. Закрити вентиля 4 і 8, відкрити вентиля 7 і 3. Спостерігаючи за показами приладів, добитися такої роботи установки, щоб витрата води і температура гарячої і холодної води на вході до теплообмінника були такими ж, як і при проведенні дослідів при прямотоку.

2. Коли настане усталений режим роботи установки, провести дослід за методикою, яка викладена для прямотоку.

3. По закінченню випробування на протитоку відключити електронагрівач і через кілька хвилин закрити вентиль 6.

## Протокол випробувань

Величина	Позна- чення	Оди- ниця	Прямотік			Протитік		
			Номер досліду					
			1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Температура грійної води:								
На вході	$t_1'$	°C						
На виході	$t_1''$	°C						
Температура нагрівної води:								
На вході	$t_2'$	°C						
На виході	$t_2''$	°C						
Час	$\tau$	с						
Витрата нагрівної води	$g$	кг						
Площа поверхні теплообмінника	$F$	м <sup>2</sup>						
Діаметр каналу гарячої води								
	$d_1$	м						
	$d_2$	м						

### Обробка результатів вимірювань:

1. Обчислити середні значення величин, які виміряні.
2. За формулою  $G_2 = g / \tau$  обчислити секундні витрати нагрівної води.
3. За формулами обчислити середній температурний напір, кількість теплоти і коефіцієнт теплопередачі.
4. За формулою  $W = 4G_2 / \rho_e \pi (d_1^2 - d_2^2)$  обчислити швидкість руху нагрівної води.
5. Побудувати для кожної схеми руху теплоносіїв залежність  $k = f(W)$ .
6. За одержаними результатами зробити висновки.

### Контрольні запитання:

1. Що таке теплообмінник? Назвіть типи теплообмінників.
2. Як записується рівняння теплового балансу?
3. Напишіть рівняння теплопередачі і поясніть його зміст
4. Що характеризує коефіцієнт теплопередачі і від чого він залежить?
5. Як можна інтенсифікувати процес переносу теплоти у теплообмінниках?



## ВЛАСТИВОСТІ ВОЛОГОГО ПОВІТРЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ ПІДІГРІТИМ ПОВІТРЯМ

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

### 6.1. 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  $P_{вп}$  є сума парціальних тисків сухого повітря  $P_{сп}$  і водяної пари  $P_n$ :

$$P_{вп} = P_{сп} + P_n. \quad (6.1)$$

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. 6.1, 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  $t_p$ .

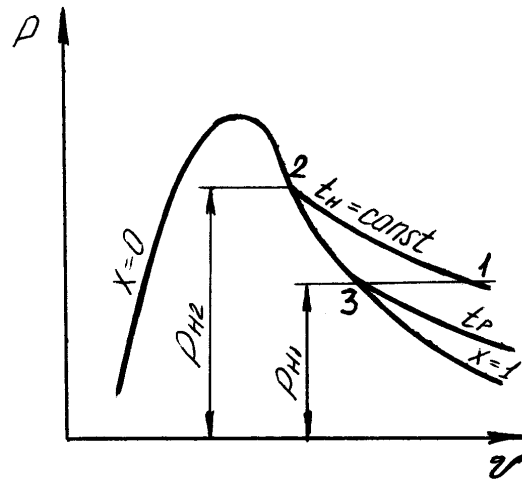


Рис. 6.1. Процеси водяної пари у вологому повітрі

Суміш сухого повітря з перегрітою парою називається ненасиченим вологим повітрям. Стан перегрітої пари на  $P$ - $V$  діаграмі (рис. 6.1) характеризується точкою 1.

Кількість вологи у повітрі характеризується абсолютною  $\rho_n$  і відносною  $\varphi$  вологістю, а також вологовмістом  $d$ .

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

$$\frac{m_n}{V_{\text{вв}}} = \frac{m_n}{V_n} = \rho_n \text{ кг/м}^3, \quad (6.2)$$

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

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

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_n}. \quad (6.3)$$

Значення  $\varphi$  може змінюватись від 0 (сухе повітря) до 100 % (вологе повітря).

З достатньою точністю відносну вологість можна визначити за формулою:

$$\varphi = \frac{P_n}{P_n} \cdot 100\%, \quad (6.4)$$

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 вологість зменшуються. Парціальний тиск насиченої пари  $P_n$  визначають за допомогою таблиць насиченої пари по температурі  $t_n = t_{в.в.}$ . Дійсний парціальний тиск водяної пари знаходять з таблиць за температурою точки роси.

Вологовміст не залежить від температури. Вологовмістом повітря називається маса водяної пари, яка припадає на 1 кг сухого повітря; кг пари / кг сухого повітря:

$$d = \frac{m_{вн}}{m_{сн}} = 0.622 \frac{P_n}{B - P_n}. \quad (6.5)$$

Густина вологого повітря:

$$\rho_{вн} = \rho_{сн} + \rho_n = \rho_{сн} (1 + d) = \rho_n \frac{1 + d}{d}, \quad (6.6)$$

де  $\rho_{сн}, \rho_n$  - 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  $\varphi_1$  і температуру  $t_1$ , надходить у калорифер, де його температура підвищується до

$t_2$ , а відносна вологість зменшується до  $\varphi_2$ . 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  $h-d$  діаграму вологого повітря (рис.6.2).

Стан вологого повітря на діаграмі можна визначити, якщо відомі будь-які два параметри ( $\varphi$  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  $135^\circ$  до осі ординат. Тому лінії  $h = const$  нахилені під кутом  $45^\circ$  до горизонту. Відлік ентальпії слід обирати по нахиленим лініям (направлення відліку зображено константою  $h$ ).

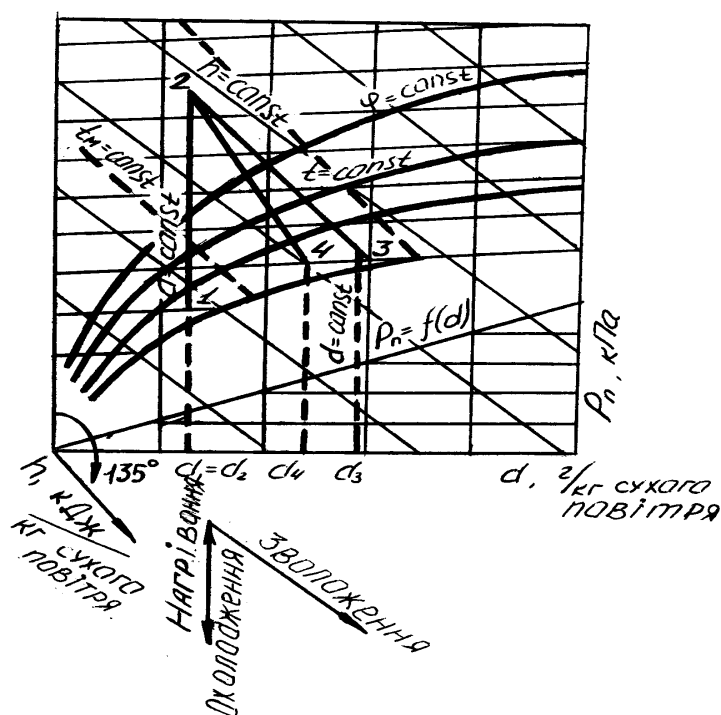


Рис. 6.2.  $h-d$  діаграма вологого повітря

На діаграмі показано: ізоТЕРМИ сухого  $t_c$  і мокрого термометра  $t_m$  (штрих-пунктирні лінії), криві сталої відносної вологості  $\varphi = const$ . Найнижча крива  $\varphi =$

100 %. При  $\varphi = 100$  % температури сухого і мокрого термометрів рівні, тому на цій кривій вони сходяться в одній точці.

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. 6.2, 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  $\varphi$  зменшується, ентальпія збільшується, а при охолодженні - навпаки.

Теплоту процесу нагрівання (охолодження) повітря знаходять за формулою:

$$q = h_2 - h_1. \quad (6.7)$$

Процес сушіння, в якому теплота витрачається тільки на випаровування води, називається теоретичним. На  $h-d$  діаграмі зміна стану повітря в такому процесі відображається лінією сталої ентальпії  $h_2 = h_3 = const$  (рис.6.2, лінія 2-3), тому що теплота, витрачена на випаровування, повністю повертається до сушильного агента 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:

$$\Delta d = d_3 - d_1. \quad (6.8)$$

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 відображається 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:

$$\Delta d = d_4 - d_1. \quad (6.9)$$

Наведена на рис. 6.2  $h-d$  діаграма дає можливість знаходити точку роси для будь-якого стану волого повітря. Для цього треба із даної точки, наприклад, 1, опустити перпендикуляр до перетинання з лінією  $\varphi = 100 \%$ . Ізотерма, яка відповідає цій точці, і дасть температуру точки роси  $t_p$ .

### 6.3. Схема установки

Установка для вивчення властивостей вологого повітря і дослідження теоретичного і дійсного процесів сушіння зображена на рис. 6.3.

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.

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.

### 6.3. 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.

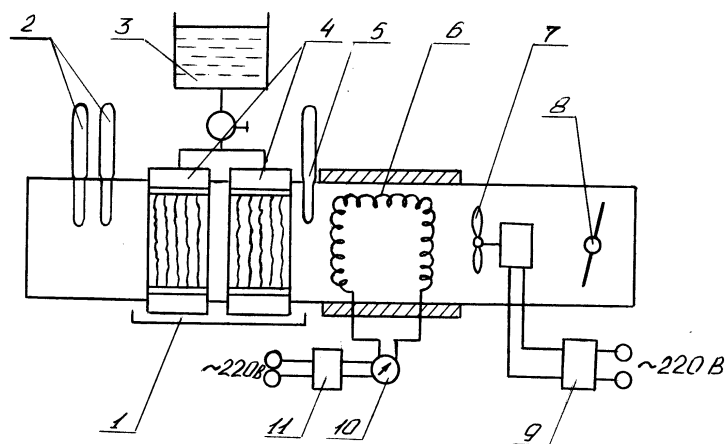


Рис. 6.3. Установка для сушіння вологим повітрям.

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.6.4.)

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  $h-d$  діаграми вологого повітря.

#### 6.4. Порядок проведення розрахунків

1. Знайти парціальний тиск водяної пари в атмосферному повітрі (точка 1 на рис.6.2) за формулою:

$$P_{n1} = P_{n1} - AB_0(t_c - t_m), \quad (6.10)$$

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:

$$B_0 = B(1 - 0.000172t_1), \quad (6.11)$$

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.

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  $\phi_1$  за номограмою (рис.6.4).

3. Вологовміст повітря  $d_1$  розрахувати за формулою (6.5).

4. Ентальпію вологого повітря обчислюємо з виразу:

$$h_1 = t_1 + (2490 + 1.97t_1)d_1. \quad (6.12)$$

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 слідуючим чином: з таблиці насиченої пари знайти  $P_{нз}$ , за номограмою знайти  $\varphi_3$ , розрахувати  $P_{нз} = \varphi_3 P_{нз}$  і вологовміст з (6.5).

7. Побудувати процеси нагрівання і сушіння в  $h-d$  діаграмі в такій послідовності:

- знайти на діаграмі т.1 (на перетинанні ізотерми  $t_{c1}$  і  $t_{m1}$  або ізотерми  $t_c$  і  $\varphi_1$ );
- 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 (6.7) і (6.8) визначити кількість теплоти, витраченої на нагрівання 1 кг сухого повітря і вологи, 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 вологи:

$$l = \frac{1000}{d_3 - d_1}. \quad (6.13)$$

та для випаровування  $W$  кг вологи; кг сухого повітря:

$$L = l \cdot W. \quad (6.14)$$

11. Розрахувати витрату теплоти на процес сушіння; кДж:

$$Q = q \cdot L. \quad (6.15)$$

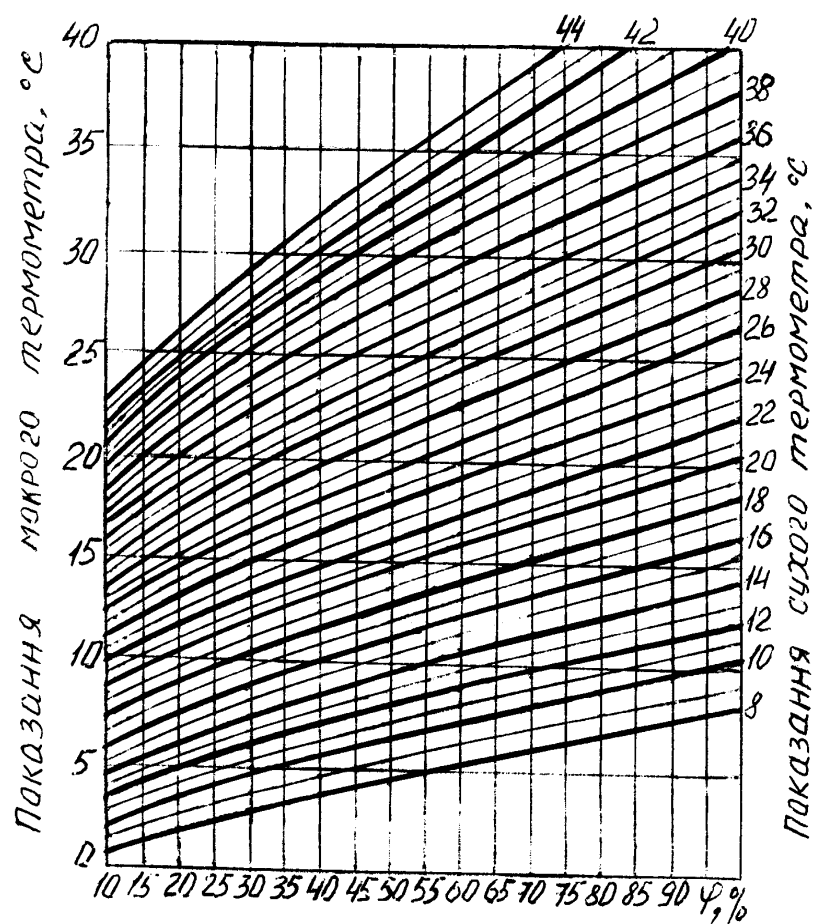


Рис. 6.4. Номограма для визначення відносної вологості повітря за показанням аспіраційного психрометра

### Протокол випробувань

Параметр	Позначення	Одиниця виміру	Повітря		
			Атмос-ферне	за калори-фером	за сушарк ою
Атмосферний тиск	$B$	МПа			
Температура: сухого термометра	$t_c$	°C			
мокрого термометра	$t_m$	°C			

# Протокол розрахунків

Пара-метр	Поз-на-чен-ня	Оди-ниця	Розрахунковий метод				За $hd$ -діаграмою Додаток №6		
			Формула або додток	Атмосферне повітря	Повітря за калорифером	Повітря за сушиль-ною	Атмосферне повітря	Повітря за калорифером	повітря за сушиль-ною комерою
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Парціаль-ний тиск насиче-ної пари  
Парціаль-ний тиск водяної пари  
Густина насиче-ної пари  
Атмос-ферний тиск, при-веде-ний до °C  
Відносна вологість  
Абсо-лютна воло-гість  
Волого-вміст  
Ентаппія вологого повітря  
Темпе-ратура точки роси  
Кіль-кість випаро-вуваної

$P_H$  МПа

$P_n$  МПа (6.10)

$\rho_H$  кг/м<sup>3</sup>

$B$  МПа (6.11)

$\varphi$  % (6.4)

$\rho_n$  кг/м<sup>3</sup> (6.3)

$d$  кг/кг  
сух.пов. (6.5)

$h$  кДж/кг  
сух.пов. (6.12)

$t_p$  °C

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
вологи	$\Delta d$	кг/кг							
		сух.пов. (6.8)							
Теплота підведена до калорифера	$q$	кДж/кг							
		сух.пов. (6.7)							

### Контрольні запитання:

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  $h-d$  діаграмі?

### Лабораторна робота № 7

## 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.

### 7.1. 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 слідуючі 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 і рециркуляційного повітря. Найбільш економічні системи іншого 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  $hd$  – діаграмі, зображеній на рис. 7.1.

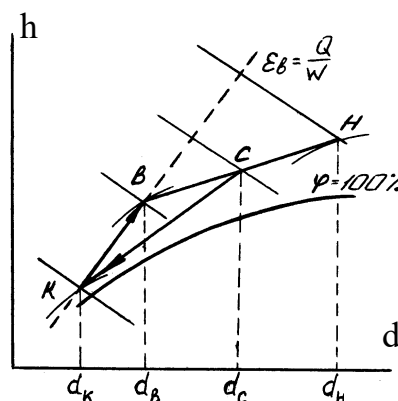


Рис. 7.1. Схематичне зображення процесу кондиціювання повітря у літній період в

### $h-d$ – діаграмі

Суміш зовнішнього і внутрішнього (рециркуляційного) потоків повітря, яке надходить на обробку в кондиціонер, на  $h-d$  – 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 пропорційна змішуваним масам зовнішнього  $G_H$  і внутрішнього  $G_B$  повітря:

$$\frac{BC}{(HC)} = \frac{G_H}{G_B} = \frac{(d_c - d_b)}{(d_h - d_c)}. \quad (7.1)$$

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:

$$Q = G(h_B - h_K); \quad (7.2)$$

$$W = G(d_B - d_K), \quad (7.3)$$

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 тепловий потік ( $Q$ ) на масу вологи ( $W$ ), отримаємо:

$$\varepsilon_B = \frac{Q}{W} = \frac{(h_B - h_K)}{(d_B - d_K)}, \quad (7.4)$$

де  $\varepsilon_B$  – 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 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, повинна завжди залишатись на лінії постійного тепловологісного відношення, що проходить під кутом, визначеним значенням  $\varepsilon_K$ .

## 7.2. 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. 6.2 зображена принципова схема кондиціонера. Металевою перегородкою з теплозвуковою ізоляцією корпус поділений на два герметичних відсіки: зовнішній і внутрішній. В перегородці передбачено отвір, що перекривається заслінкою, за допомогою якої регулюють притік 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. 7.3.

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.

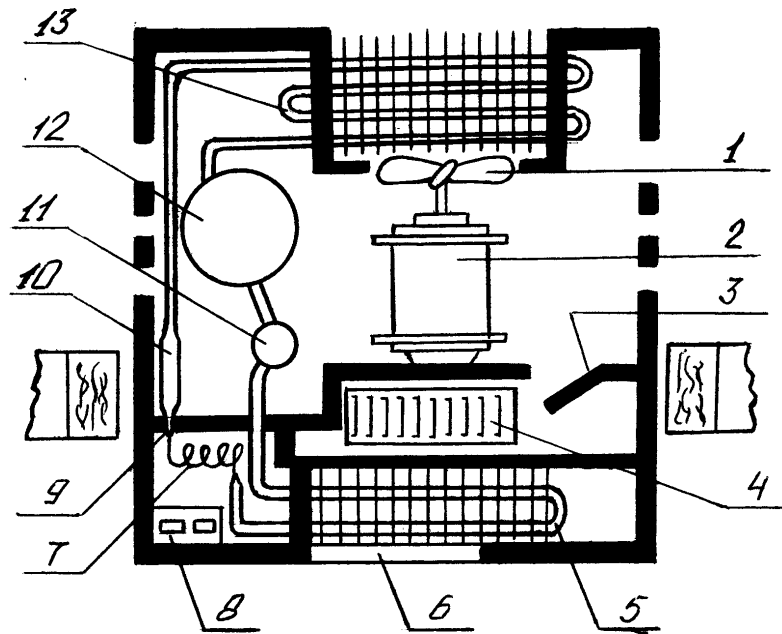


Рис. 7.2. Принципова схема побутового кондиціонера:

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

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 (d) 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.



### 7.3. Порядок проведення роботи

1. Ознайомитись з обладнанням кондиціонера на місці. На передній стінці кондиціонера є панель керування, 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.

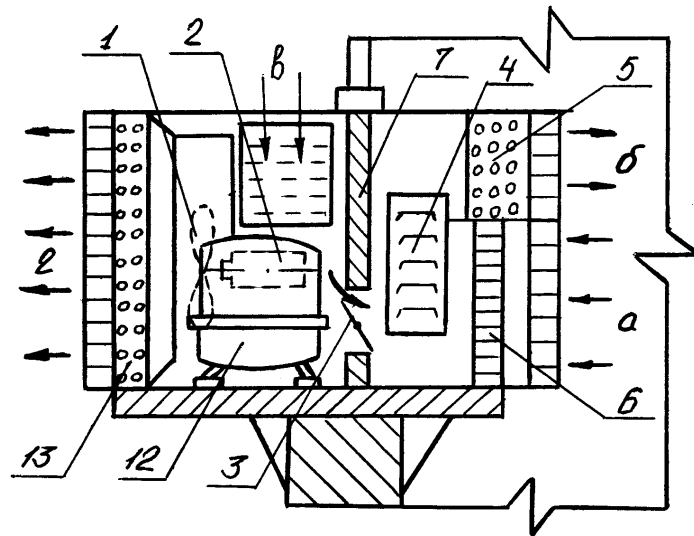


Рис 7.3. Схема руху повітряних потоків в кондиціонері:

- а* – вхід рециркуляційного повітря приміщення;
- б* – вихід охолодженого повітря в приміщення;
- в* – вхід зовнішнього повітря;
- г* – вихід нагрітого повітря назовні.

3. Включити кондиціонер в роботу поворотом ручки перемикача в одне з чотирьох положень відповідно з бажаним режимом. У режимі «Конд» (кондиціонування) знижується температура в приміщенні, вентилується 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 «Викл» (вимкнено) і відключити від мережі.

6. Виміряти площу  $F(\text{м}^2)$  випускного вікна кондиціонера.

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

#### Протокол випробувань

Параметр			№ вимір.			Середнє значення
			1	2	3	
Повітря	Зовнішнє	Температура термометра: сухого $t_{сз}$ мокрого $t_{мз}$				
	Внутрішнє (рециркуляційне)	Температура термометра: сухого $t_{св}$ мокрого $t_{мв}$				
	Кондиційоване	Температура термометра: сухого $t_{ск}$ мокрого $t_{мк}$				
	швидкість повітря	$v, \text{м/с}$				

#### 7.4. Обробка результатів вимірювань

За середніми арифметичними значеннями температур зовнішнього, внутрішнього і кондиційованого повітря за номограмою (рис.6.4) визначити відносну вологість і на  $hd$  – діаграмі знайти положення точок  $H$ ,  $B$ ,  $K$ , а використовуючи формулу (7.1) і точку  $C$ , яка характеризує змішане повітря перед обробкою в кондиціонері. За допомогою  $hd$  – 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	$\varphi$	%	рис. 7.4.				
Ентальпія повітря	$h$	кДж/кг	h-d діаграма				
Вологовміст	$d$	кг/кг сух.пов	h-d діаграма				
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	$G_{cux}(h_c - h_k)$				
Видатність кондиціонера по сухому повітрю	$G_{cux}$	кг сух. пов./с	$G/(1 + 0.001d_g)$				
Маса вологи, яка випадає з повітря	$W$	кг/с	$G_{cux}(d_c - d_k)$				

### **Контрольні запитання:**

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?

### **Завдання для самостійної роботи**

Завдання з самостійної роботи з курсу „ Енергоефективні технології в теплотехнічних процесах і установках» виконуються паралельно з засвоєнням теоретичного матеріалу лекцій. Перед виконанням Завдання кожен здобувач повинен вивчити теоретичний матеріал за конспектом лекції, рекомендованою літературою і методичними вказівками.

Результати самостійної роботи оформлюються на окремих аркушах формату А4. Сторінки звіту нумеруються у такому порядку. Першою сторінкою вважається титульний лист, на якому номер не ставиться. Наступний аркуш повинен мати номер 2 і т. д. Номер аркушу ставиться у правому верхньому кутку без крапки, дефісів або інших знаків. На титульному аркуші зверху вказується міністерство, університет, кафедра. Посередині титульного аркуша приводиться: самостійна робота №\_\_ з дисципліни «Енергоефективні технології в теплотехнічних процесах і установках»; нижче вказується прізвище, ініціали і номер групи здобувача, а також вчене звання, прізвище та ініціали викладача. Внизу титульного аркушу вказується місто і рік, наприклад: „Кропивницький , 2022 р.”.

### Завдання для самостійної роботи №1

**Задача 1.1.** Сталева стінка парового котла товщиною  $\delta_2$  вкрита з одного боку шаром сажі товщиною  $\delta_1$ , а з другого – шаром накипу товщиною  $\delta_3$ . Через стінку проходить питомий тепловий потік  $q$ . Визначити загальний термічний опір і загальне падіння температури стінки. Значення коефіцієнтів теплопровідності: для сажі  $\lambda_1 = 0.1$  Вт/(м К); для вуглецевої сталі  $\lambda_2 = 50$  Вт/(м К); для накипу  $\lambda_3 = 1.5$  Вт/(м К). Вихідні дані в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Параметр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\delta_1$ , мм	0.2	0.1	0.3	0.4	0.5	0.6	0.15	0.25	0.35	0.45	0.55	0.65	0.3	0.4	0.5
$\delta_2$ , мм	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	3.0	4.0	5.0	6.0
$\delta_3$ , мм	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
$q \cdot 10^2$ , Вт/м <sup>2</sup>	80	80	80	85	85	95	95	90	90	90	80	80	80	80	80

**Задача 1.2.** Визначити тепловий потік через стінку печі з вогнетривкої цегли [ $\lambda = 12$  Вт/(м К)] завширшки  $\delta$ , заввишки  $h$  і завтовшки  $S$ , якщо на поверхнях стінки підтримуються температури  $t_{cm1}$  і  $t_{cm2}$ . Визначити витрату натурального і умовного палива, еквівалентну розрахованим тепловим втратам, якщо к. к. д. печі 0.6, теплота згоряння палива 32000 кДж/кг. Вихідні дані в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Параметр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\delta$ , мм	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
$h$ , мм	1.5	1.8	2.0	2.2	3.0	2.5	3.5	2.8	3.0	3.0	2.8	3.5	2.5	3.0	4.0
$S$ , мм	0.25	0.4	0.45	0.3	0.35	0.5	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.25	0.3	0.4	0.5
$t_{cm1}$ $10^2$ , °C	10	10.5	11	11.5	12	9.5	9.0	8.5	8.0	8.2	8.5	8.8	9.0	9.2	9.5
$t_{cm2}$ $10^2$ , °C	40	45	50	55	60	65	70	75	40	45	50	55	60	65	70

**Задача 1.3.** Стінка циліндричної форми зроблена з матеріалу, середній коефіцієнт теплопровідності якого  $\lambda = 0.6 \text{ Вт/(м К)}$ , а температура на внутрішній поверхні стінки  $t_{cm1}$ . Визначити температуру зовнішньої поверхні стінки  $t_{cm2}$ , якщо виміряний тепловий потік через стінку при  $\tau = 300 \text{ с}$  становить  $60 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}$ . Внутрішній і зовнішній діаметри дорівнюють  $d_1$  і  $d_2$ . Вихідні дані в табл. 8.3.

Таблиця 1.3

Пара-метр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$t_{cm1}, ^\circ\text{C}$	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160
$d_1, \text{мм}$	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.1	0.15	0.25	0.35	0.2	0.3	0.4	0.45
$d_2, \text{мм}$	0.5	0.45	0.4	0.35	0.55	0.6	0.65	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.6	0.7	0.5

[1, с. 134 – 140; 2, с. 306 – 316; с. 164 – 175; 4, с. 136 – 146]

## Завдання для самостійної роботи №2

**Задача 2.1.** Тепловий потік від пари, що конденсується у конденсаторі, до стінки трубки дорівнює  $q$  при температурі пари  $t$ . Визначити температуру на поверхні трубки конденсатора, прийнявши  $\alpha = 8000 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$ . Вихідні дані в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Параметр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$q, \text{кВт/м}^2$	100	105	110	115	120	125	130	135	140	95	100	105	110	115	120
$t, ^\circ\text{C}$	40	45	50	55	60	65	70	40	45	50	55	60	65	70	75

**Задача 2.2.** Трубка, яка розташована вертикально з зовнішнім діаметром і довжиною  $l > 50d$  омивається водою з швидкістю  $w$ . Температура поверхні трубки  $t_{ct}$ , середня температура води в трубці  $t_{pid}$ . Визначити коефіцієнт тепловіддачі від стінки трубки до води і середню по довжині трубки густину теплового потоку. Вихідні дані знаходяться в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Параметр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$d$ , мм	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$w$ , м/с	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4
$t_c$ , °C	70	75	80	85	90	95	60	65	70	75	80	85	90	95	80
$t_{ж}$ , °C	20	25	30	35	40	45	20	25	30	35	40	45	30	35	40

**Задача 2.3.** У каналі прямокутного перерізу 30x10 см рухається повітря, нагріваючись від  $t'$  до  $t''$ . Визначити питомий тепловий потік, якщо розрахункова витрата повітря  $V$ , а середня температура стінки каналу  $t_{cm}$ . Вихідні дані в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Параметр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$t'$ , °C	25	30	35	40	45	50	55	25	30	35	40	45	50	55	60
$t''$ , °C	110	115	120	125	130	140	145	150	155	160	165	170	180	185	190
$V$ , м <sup>3</sup> /с	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
$t_c$ , °C	140	130	150	145	165	160	155	165	180	185	190	185	200	205	210

### Завдання для самостійної роботи № 3

**Задача 3.1.** У вологе повітря з параметрами  $t_1$  і  $\phi_1$  випаровується вода при адіабатних умовах. Температура повітря при цьому знижується до  $t_2$ . Визначити відносну вологість і вологовміст повітря у кінцевому стані. Вихідні дані в табл. 3.1. Задачу розв'язати за допомогою  $h-d$  діаграми вологого повітря.

Таблиця 3.1.

Параметр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$t_1$ , °C	20	25	30	35	40	22	30	28	25	30	32	38	45	42	20
$\phi_1$ , %	5	10	5	10	20	10	20	10	5	10	20	10	20	10	10
$t_2$ , °C	5	10	15	20	25	10	15	15	20	25	15	20	22	20	15

**Задача 3.2.** Стан вологого повітря характеризується параметрами  $t_c$  і  $\phi$ .

Визначити ентальпію, парціальний тиск і температуру точки роси. Вихідні дані в табл. 3.2.

Таблиця 3.2.

Параметр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$t_c, ^\circ\text{C}$	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	80	75	70	65
$\varphi, \%$	5	10	5	20	10	30	20	60	20	50	60	5	5	10	10

**Задача 3.3.** Вологе повітря ( $P = 100$  кПа) при  $t_1$  і  $\varphi_1$  нагрівається до  $t_2$ . Визначити кінцевий стан вологого повітря і питому витрату тепла на нагрівання. Вихідні дані в табл.3.3.

Таблиця 3.3.

Параметр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$t_1, ^\circ\text{C}$	20	25	30	35	40	45	50	55	15	20	25	30	35	40	45
$\varphi_1, \%$	20	60	40	30	80	60	40	30	80	60	20	30	60	10	30
$t_2, ^\circ\text{C}$	50	60	70	55	80	90	70	85	50	50	60	65	75	50	80

**Задача 3.4.** Визначити питому витрату теплоти (кількість теплоти, яка витрачається на вилучення 1 кг вологи) при сушінні в теоретичній сушарці за наступних умов:

а) температура зовнішнього повітря  $t_a$ , відносна вологість  $\varphi_a$ ;

б) температура повітря після калорифера  $t_g$ ; в) в процесі сушіння (адіабатне насичення повітря водяною парою при  $H = \text{const}$ ) температура вологого повітря зменшується на  $\Delta t$ ; г) барометричний тиск 745 мм. рт. ст.

Задачу розв'язати аналітично за допомогою  $h-d$  діаграми. Процеси в теоретичній сушарці відобразити за допомогою  $h-d$  діаграми. Вихідні дані в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Параметр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$t_a, ^\circ\text{C}$	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30
$\varphi_a, \%$	5	10	15	20	25	25	20	15	10	5	20	15	5	25	30
$t_g, ^\circ\text{C}$	40	45	50	55	60	60	55	50	45	40	45	40	50	55	60
$\Delta t$	10	15	20	25	30	35	30	25	20	10	15	10	20	25	30



## Список літератури

1. Герасимов Г.Г., Енергоощадність в теплоенергетиці. Навчальний посібник. Рівне: Червінко А.В., 2015. – 382 с.
2. Клименко В.В., Кравченко В.І., Боков В.М, Гуцул В.І. Технологічні основи виготовлення біопалива з рослинних відходів та їх композитів: Монографія. / За ред. В.В. Клименка – Кропивницький: ПП «Ексклюзив-Систем», 2017. – 162 с.
3. Клименко В. В., Кравченко В. І., Телюта Р. В. Энергозбереження в теплотехнологічних процесах та установах: Навчальний посібник. – Кропивницький: ПП Ексклюзив-Систем, 2020. – 219 с.
4. Энергозбереження в теплотехнологічних процесах та установах: навч. посіб. / [В. В. Клименко, В. І. Кравченко, Р. В. Телюта] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький: Ексклюзив-Систем, 2020. – 220 с.
5. Reuse is authorised provided the source is acknowledged. The reuse policy of European Commission documents is regulated by Decision 2011/833/ EU (OJ L 330, 14.12.2011, p. 39.
6. BS EN 746-1:1997+A1:2009 Industrial thermoprocessing equipment common safety requirements for industrial thermoprocessing equipment.
7. Demirel, Yaşar. "Energy Conservation." In Energy, 355–406. Cham: Springer International Publishing, 2021. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-56164-2\\_9](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-56164-2_9).
8. Technologies for Solar Thermal Energy: Theory, Design and, Optimization/ M. Washim Akram<sup>1</sup>, Md Hasanuzzaman<sup>2</sup> : Elsevier, 2022 - <http://dx.doi.org/10.1016/C2020-0-00601-8>.

## **ДОДАТОК**

## Термо ЕРС хромель-алюмінієвої термопари (градування ХА), мВ

t, °C	0	1	2	3	4
0	0.00	0.04	0.08	0.12	0.16
10	0.40	0.44	0.48	0.52	0.56
20	0.80	0.84	0.88	0.92	0.96
30	1.20	1.24	1.28	1.32	1.36
40	1.60	1.64	1.68	1.72	1.76
50	2.00	2.04	2.08	2.12	2.16
60	2.40	2.44	2.48	2.52	2.56
70	2.80	2.84	2.88	2.92	2.96
80	3.20	3.24	3.28	3.32	3.36
90	3.60	3.64	3.68	3.72	3.76
100	4.00	4.04	4.08	4.12	4.16
110	4.40	4.44	4.48	4.52	4.56
120	4.82	4.86	4.90	4.94	4.98
130	5.23	5.27	5.31	5.35	5.39
140	5.63	5.67	5.71	5.75	5.79
150	6.03	6.07	6.11	6.15	6.19
160	6.43	6.47	6.51	6.55	6.59
170	6.85	6.89	6.93	6.97	7.01
180	7.25	7.29	7.33	7.37	7.41
190	7.66	7.70	7.74	7.78	7.82
200	8.06	8.10	8.14	8.18	8.22
210	8.47	8.51	8.55	8.59	8.63
220	8.88	8.92	8.96	9.00	9.04
230	9.29	9.33	9.37	9.41	9.45
240	9.70	9.74	9.78	9.82	9.86

## Термо ЕРС хромель-алюмінієвої термопари (градування ХА), мВ

t, °C	5	6	7	8	10
0	0.20	0.24	0.28	0.32	0.36
10	0.60	0.64	0.68	0.72	0.76
20	1.00	1.04	1.08	1.12	1.16
30	1.40	1.44	1.48	1.52	1.56
40	1.80	1.84	1.88	1.92	1.96
50	2.20	2.24	2.28	2.32	2.36
60	2.60	2.64	2.68	2.72	2.76
70	3.00	3.04	3.08	3.12	3.16
80	3.40	3.44	3.48	3.52	3.56
90	3.80	3.84	3.88	3.92	3.96
100	4.20	4.24	4.28	4.32	4.36
110	4.61	4.65	4.69	4.73	4.77
120	5.02	5.07	5.11	5.15	5.19
130	5.43	5.47	5.51	5.55	5.59
140	5.83	5.87	5.91	5.95	5.99
150	6.23	6.27	6.31	6.35	6.39
160	6.64	6.68	6.72	6.76	6.80
170	7.05	7.09	7.13	7.17	7.21
180	7.46	7.50	7.54	7.58	7.62
190	7.86	7.90	7.94	7.98	8.02
200	8.26	8.30	8.34	8.38	8.42
210	8.67	8.71	8.75	8.79	8.83
220	9.08	9.12	9.15	9.20	9.24
230	9.49	9.53	9.57	9.61	9.65
240	9.90	9.93	9.98	10.02	10.06

## ЗМІСТ

Загальні положення .....	3
Лабораторна робота №1 .....	4
Лабораторна робота №2 .....	14
Лабораторна робота №3 .....	25
Лабораторна робота №4 .....	31
Лабораторна робота №5 .....	35
Лабораторна робота №6 .....	41
Лабораторна робота №7 .....	52
Завдання для самостійної роботи .....	60
Список літератури .....	65
Додаток .....	66