



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

Міністерство освіти і науки України

Національний університет водного  
господарства та природокористування

Кафедра гідроенергетики, теплоенергетики  
та гідравлічних машин

**01-06-51**

## **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до лабораторних занять з навчальної дисципліни  
«Тепломасообмін» для здобувачів вищої освіти першого  
(бакалаврського) рівня за освітньо-професійними програмами  
«Теплоенергетика», «Гідроенергетика» спеціальностей  
144 «Теплоенергетика» та 145 «Гідроенергетика»  
усіх форм навчання.

Частина друга

Рекомендовано науково-  
методичною радою з якості  
ННІВГП  
Протокол № 2 від 24.10.19 р.

Рівне – 2019



Методичні вказівки до лабораторних занять з навчальної дисципліни «Тепломасообмін» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійними програмами «Теплоенергетика», «Гідроенергетика» спеціальностей 144 «Теплоенергетика» та 145 «Гідроенергетика» усіх форм навчання. Частина друга [Електронне видання] / Куба В. В., Серeda В. В. – Рівне : НУВГП, 2019. – 24 с.

Укладачі:

Куба В. В. – старший викладач кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин;

Серeda В. В. – доцент кафедри теоретичної та промислової теплотехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Відповідальний за випуск – Рябенко О. А., д.т.н., професор, завідувач кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин.

Керівник групи забезпечення спеціальності

Рябенко О. А.



## ЗМІСТ

Вступ	3
Лабораторна робота № 7	4
Лабораторна робота № 8	11
Лабораторна робота № 9	19
Додаток	23
Література	24

## ВСТУП

В даних методичних вказівках приведено теоретичні основи, опис експериментальних установок, практичні рекомендації для проведення лабораторних робіт і обробки дослідних даних.

Метою проведення лабораторних робіт є закріплення знань з теорії теплопровідності, конвекційного теплообміну, променевого теплообміну та розрахунку теплообмінних апаратів; ознайомлення з методикою експериментального дослідження основних характеристик процесів теплообміну, та самих процесів з використанням теорії подібності і засвоєння наступних ключових понять: тепловий потік, густина теплового потоку, температурний напір, коефіцієнт теплопровідності, вільний і вимушений рух рідини, коефіцієнт тепловіддачі, теплофізичні властивості рідин та газів, степінь чорноти тіл, коефіцієнт випромінювання, тепловий баланс, теплопередача.



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

### Тема: **ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВИПРОМІНЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ МАТЕРІАЛІВ**

**Мета:** Експериментально визначити коефіцієнт випромінювання електропровідного матеріалу в залежності від температури.

#### 7.1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Всі тіла випромінюють енергію у вигляді електромагнітних хвиль, які поширюються у вакуумі зі швидкістю світла  $c=299,8 \cdot 10^6$  м/с.

Від довжини хвилі залежить дія випромінювання при падінні його на тіло (табл. 7.1).

Таблиця 7.1

Наближена класифікація електромагнітних коливань

Види випромінювання	Довжина хвилі випромінювання $\lambda$ , м
Космічне (корпускулярне)	біля $0,05 \cdot 10^{-12}$
$\gamma$ – випромінювання	$0,5 \cdot 10^{-12} \div 0,1 \cdot 10^{-12}$
Рентгенівське	$1,1 \cdot 10^{-12} \div 20 \cdot 10^{-9}$
Ультрафіолетове	$20 \cdot 10^{-9} \div 0,4 \cdot 10^{-6}$
Видиме	$0,4 \cdot 10^{-6} \div 0,8 \cdot 10^{-6}$
Теплове (інфрачервоне)	$0,8 \cdot 10^{-6} \div 0,8 \cdot 10^{-3}$
Електромагнітні хвилі	$0,2 \cdot 10^{-3} \div 10^3$

Теплове випромінювання, що заповнює деяку область простору, як процес поширення електромагнітних хвиль, які випромінюються тілом, не залежить від температури навколишнього середовища. Протилежно променевому переносу енергії тепловий потік, який виникає в твердих, рідких і газоподібних тілах під дією теплопровідності і конвекції, пов'язаний з температурним полем через градієнт температури.

Більшість твердих і рідких тіл випромінюють енергію всіх довжин хвиль, тобто мають суцільний спектр випромінювання ( $\lambda$  змінюється від 0 до  $\infty$ ). До таких тіл відносяться непровідники і напівпровідники струму, а також метали з окисленою шорсткою поверхнею. Чисті метали з відполірованою поверхнею, гази і пари випро-



мінюють енергію дискретно в певних інтервалах довжин хвиль, тобто мають переривчастий спектр. Тверді і рідкі тіла мають значну поглинаючу і випромінюючу здатність. Ці процеси в них проходять в тонких поверхневих шарах.

Інтенсивність випромінювання залежить від природи тіла, його теплового стану (температури), довжини хвиль, стану поверхні, а для газів і парів ще від товщини шару і тиску, так як їх випромінювання і поглинання здійснюються всіма частинками об'єму.

Закони теплового випромінювання отримані для ідеального абсолютно чорного тіла і термодинамічної рівновазі. Рівноважним тепловим випромінюванням називають теплове випромінювання тіл в замкнених ізотермічних системах. Теплове випромінювання має динамічний характер. Тіла в рівноважній термодинамічній системі одночасно випромінюють і поглинають енергію в однакових кількостях, а результуючий потік енергії дорівнює нулю ( $Q_{\text{рез}}=0$ ).

Відношення густини потоку випромінювання, який випускається в нескінченно малому інтервалі довжин хвиль, до величини цього інтервалу довжин хвилі називається спектральною густиною потоку випромінювання  $E_\lambda$ .

Залежність спектральної густини потоку випромінювання від довжини хвиль і температури для абсолютно чорного тіла встановлюється законом Планка:

$$E_{0\lambda} = \frac{c_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1}, \quad (7.1)$$

де  $E_{0\lambda}$  – спектральна густина потоку випромінювання (спектральна інтенсивність випромінювання) абсолютно чорного тіла,  $[E_{0\lambda}] = 1 \text{ Вт}$ ;

$e$  – основа натурального логарифма;

$c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ Вт/м}^2$  і  $c_2 = 1,438 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$  – сталі закону Планка;

$\lambda$  – довжина хвилі;

$T$  – абсолютна температура.

Довжина хвилі  $\lambda_{\text{max}}$ , на яку приходить максимум густини потоку випромінювання при даній температурі  $T$ , визначається:

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}, \quad (7.2)$$

Співвідношення (7.2) має назву закону Віна.

Закон Стефана-Больцмана встановлює залежність густини потоку інтегрального напівсферичного випромінювання абсолютно чор-



ного тіла  $E_0$  від температури:

$$E_0 = \int_0^{\infty} E_{0\lambda} d\lambda = c_0 \cdot \left( \frac{T}{100} \right)^4, \quad (7.3)$$

де  $E_0$  – густина потоку інтегрального напівсферичного випромінювання абсолютно чорного тіла;  $[E_0] = 1 \text{ Вт/м}^2$ ;

$c_0$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла,  $c_0 = 5,6687 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ;

$T$  – абсолютна температура тіла.

Закон Стефана-Больцмана строго справедливий для сірого випромінювання.

## 7.2 ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

На даній установці застосовується метод імітаційного моделювання, який дає можливість проводити експерименти по визначенню коефіцієнта випромінювання для вольфрамового і мідного дроту в залежності від температури.

Робоча ділянка виготовлена для випадку, коли площа реального циліндричного тіла  $1$  з оболонкою  $2$  мають відношення  $F_1 \ll F_2$ .

Робоча ділянка являє собою тонкий дріт із заданого електропровідного матеріалу з відповідною характеристикою випромінювальної поверхні  $F_1$ , для якої визначається коефіцієнт випромінювання  $\epsilon_1$ . Цей дріт закріплений кінцями в провідниках малого електричного опору. Підводи струму впаяні в скляну циліндричну ємність з подвійними стінками, яка створює вздовж всієї експериментальної ділянки водяну, проточну теплоприймаючу рубашку. Теплоприймаючою площею  $F_2$  по всій поверхні вгнутого тіла являється поверхня найменшого діаметру тонкої скляної стінки охолоджувальної рубашки калориметра.

В конструкції експериментальної ділянки прийнято, що витрата води із баку постійного рівня  $4$  з фільтром і відстійником  $5$  автоматично регулюється голчастим краном і регулюється за допомогою насоса  $6$ .

В комплекс вимірювальних приладів входять: прилади для вимірювання спаду напруги ( $U$ ) безпосередньо на дроті робочої ділянки і струму нагріву ( $I$ ).

Для вимірювання температури води  $t_{1\text{вх}}$  на вході і  $t_{2\text{вих}}$  на виході охолоджувальної рубашки робочої ділянки, а також для контролю

виходу ділянки на стаціонарний режим променевого теплообміну передбачений температурний датчик. Покази приладів цифрової індукції дублюється на комп'ютерному моніторі.

Із опису установки видно, що схема допускає експериментальне визначення коефіцієнтів з різних електропровідних матеріалів шляхом заміни експериментальних ділянок.

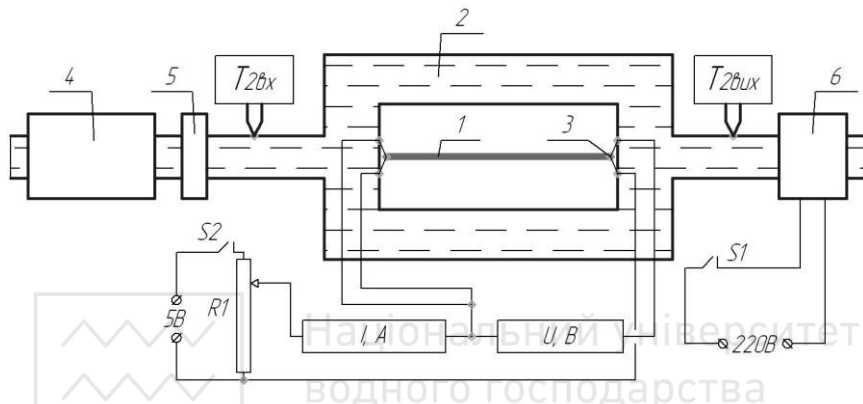


Рис. 7.1. Схема експериментальної ділянки:

- 1 – робоча ділянка; 2 – скляна вакуумна циліндрична ємність;  
3 – підводи струму; 4 – бак постійної витрати; 5 – фільтр із відстійником;  
6 – насос;  $I$  – амперметр;  $U$  – вольтметр.

### 7.3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Після включення установки в електромережу, голчастим краном відкривається подача охолоджувальної води і автоматично підтримується на всіх режимах експерименту одне і те саме значення  $T_2$  і  $\Delta t_2 \approx 1 \div 1,5$  °C.

Дослідженню на стаціонарних режимах підлягають ідентичні за методом і розрахунком варіанти:

- вольфрамова робоча ділянка 1 при різних температурних випромінюваннях;
- мідна робоча ділянка 1 при різних температурних випромінюваннях.

Дані по робочим ділянкам наведені в таблиці 7.2.

Після відображення на екрані монітора схеми експериментальної установки з вказаними робочими процесами і вимірювальних приладів на пульті установки включається тумблер живлення вимірю-

вальних приладів і можна приступати до дослідження робочого процесу. Регулятором встановлюється заданий нагрів робочої ділянки, а перемикачем проводиться запит режимних параметрів. Реєстрація значень проводиться за індикаторними приладами, покази яких дублюються на комп'ютерному моніторі. Результати експериментів заносяться в таблицю 7.3.

Таблиця 7.2

Властивості робочих ділянок

Матеріал	Температура плавлення	Діаметр	Довжина ділянки	Площа	
				Поперечного перерізу	Поверхні випромінювання
	$T_{пл}, K$	$d, m$	$L, m$	$S, mm^2$	$F_1, mm^2$
Вольфрам	$3660 \pm 60$	$0,2 \cdot 10^{-3}$	0,2	$3,14 \cdot 10^{-2}$	$12,56 \cdot 10^{-5}$
Мідь	$1356 \pm 3$	$2 \cdot 10^{-3}$		3,14	$1,256 \cdot 10^{-3}$

Таблиця 7.3

Протокол випробувань і результатів обробки даних

Номер режиму	Спад напруги	Сила струму	Температура води	Розрахункові величини						
				$U, В$	$I, А$	$t_{2ex}, ^\circ C$	$t_{2вих}, ^\circ C$	$R_1, Ом$	$T_1, К$	$T_2, К$
Вольфрамовий дріт										
1										
...										
5										
Мідний дріт										
1										
...										
5										

Після закінчення дослідів проводиться переведення всіх регулюючих органів в початкове положення. Для другого варіанту необхідні дії повторюються знову в тій же самій послідовності.



## 7.4 ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДУ

1. Визначаємо різницю температур  $t_{1вих}$  і  $t_{2вх}$  у води в охолоджувальній рубашці експериментальної ділянки,  $\Delta t_2$  не повинно перевищувати  $1 \div 1,5$  °С.

2. Визначаємо електричну потужність нагріву дроту робочої ділянки за формулою

$$Q_{1,2} = I_1 \cdot U_1, \quad (7.4)$$

де  $I_1$  – сила струму, який проходить через дріт;

$U_1$  – спад напруги на дроті робочої ділянки.

3. Визначаємо омичний опір робочої ділянки

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1}. \quad (7.5)$$

4. Так як  $\rho_1 = f(T_1)$ , то для визначення температури нагрітого дроту  $T_1$  необхідно знати опір  $\rho_1$ , який визначається за формулою

$$\rho_1 = \frac{R_1 \cdot S}{L}, \quad (7.6)$$

де  $S$  – площа поперечного перерізу дроту,  $m^2$  (див. табл. 7.2);

$L$  – довжина робочої ділянки дроту між підводами струму,  $m$  (див. табл. 7.2).

5. Після розрахунку  $\rho_1$  температура нагріву поверхні дроту  $T_1$  визначається за графіком  $T_1 = f(\rho_1)$ , рис. 7.2, який побудований на основі довідникових даних [2,4].

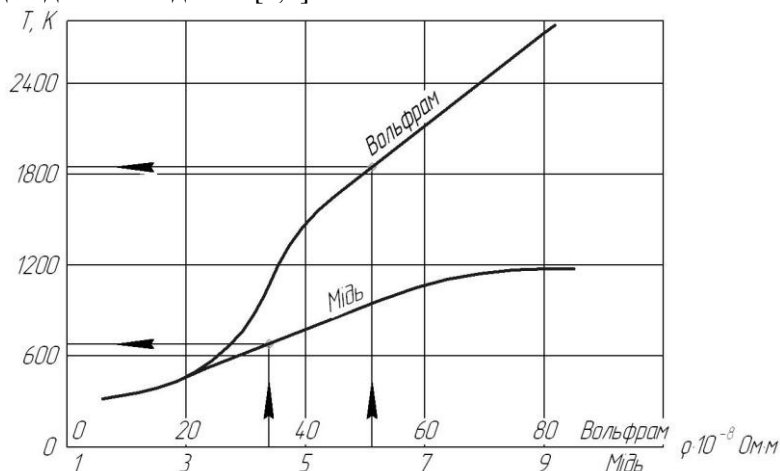


Рис. 7.2. Зміна опору вольфраму і міді в залежності від температури



5. Визначаємо температуру  $T_2$  поверхні скляної стінки, яка оточує дріт і охолоджується водою калориметра. З допустимою точністю можна вважати, що все тепло, виділене нагрітим дротом при стаціонарному режимі променевого теплообміну, віддано через скляну стінку охолоджувальній воді. Так як термостатичний опір  $(\delta/\lambda)$  тонкої скляної стінки малий, то можна прийняти, що температура  $T_2$  стінки поверхні рівна середній температурі охолоджувальної води. Тоді температуру  $T_2$  визначаємо за формулою

$$T_2 = \frac{t_{2ax} + t_{2вих}}{2} + 273. \quad (7.7)$$

6. Визначається коефіцієнт випромінювання  $c_1$  і ступінь чорноти  $\varepsilon_1$  поверхонь матеріалів за формулами

$$c_1 = \frac{Q_{1,2}}{F_1 \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}, \quad (7.8)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{c_1}{c_0}, \quad (7.9)$$

де  $c_0 = 5,6687 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла.

7. Результати обробки дослідних даних заносимо в табл. 7.3.

8. Будуємо графіки залежності коефіцієнта випромінювання і ступеня чорноти поверхні вольфрамового і мідного дроту від температури  $c_1=f(T_1)$  і  $\varepsilon_1=f(T_1)$ .

### 7.5 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що називається променевим теплообміном?
2. Закони теплового випромінювання Планка, Віна, Стефана-Больцмана?
3. Потоки випромінювання.
4. Що таке ступінь чорноти тіла?
5. Що називається чорним тілом? Сіре тіло.
6. Від чого залежить інтенсивність випромінювання?
7. Як визначити тепловий потік між двома тілами при випромінюванні?



**Тема: ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ТЕПЛООБМІННОГО АПАРАТУ**

**Мета:** За допомогою чисельного експерименту визначити залежність теплової потужності теплообмінного апарату від схеми вмикання, виду теплоносія, геометричних (зовнішній і внутрішній діаметри труби, довжина) і режимних параметрів, і визначити коефіцієнт теплопередачі в залежності від режимних параметрів.

**8.1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ**

Теплообмінні апарати використовуються для передачі тепла від одного теплоносія до іншого. Теплоносій, який має більш високу температуру і віддає тепло, називається гарячим; теплоносій, який має більш низьку температуру і сприймає тепло - холодним.

Всі теплообмінні апарати за способом передачі тепла можуть бути поділені на дві великі групи: поверхневі і контактні (рис. 8.1). В поверхневих апаратах теплоносії відділені один від одного твердою стінкою (такі апарати називаються рекуперативними), або по чергово контактують з однією і тією самою стінкою (такі апарати називаються регенеративними). Цю стінку (поверхню) називають поверхнею теплообміну.

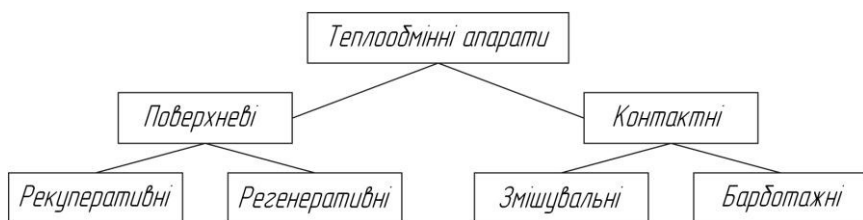


Рис. 8.1 – Класифікація теплообмінних апаратів

В рекуперативному апараті одна сторона поверхні теплообміну весь час контактує з гарячим теплоносієм, інша - з холодним. Тепло передається від одного теплоносія до іншого через стінку, яка розділяє їх. Напрямок теплового потоку в стінці залишається незмінним.

В регенеративному апараті одна і та сама поверхня теплообміну поперемінно контактує то з одним, то з іншим теплоносієм. В пері-



од нагріву поверхні теплообміну, яка називається насадкою регенератора, вона контактує з гарячим теплоносієм і акумулює тепло, яке в період охолодження віддає холодному теплоносію. Напрямок теплового потоку в стінках апарату періодично змінюється. В якості насадки в таких апаратах можуть використовуватися кулі, кільця, дрібні труби, зібрані в щільний пучок, інколи цегляна кладка (в регенераторах мартенівських печей).

В контактних теплообмінних апаратах передача тепла відбувається при безпосередньому контакті гарячого і холодного теплоносіїв, при цьому теплообмін супроводжується масообміном. В апаратах змішувального типу гарячий і холодний теплоносії перемішуються і утворюють розчини або суміші (прикладом таких апаратів можуть служити різноманітного типу скрубери або змішувачі гарячої і холодної води, що використовуються в системах водопостачання). В апаратах барботажного типу теплоносії знаходяться в різних фазах і при контакті обмінюються теплом, практично не перемішуючись між собою. Наприклад, в градирнях краплі води охолоджуються зустрічним потоком холодного повітря, а в барботерах гаряча пара охолоджується, піднімаючись крізь шар рідини. Апарати контактного типу не можуть застосовуватися, якщо робочі середовища мають різні тиски чи взагалі не можуть перемішуватись.

Найбільш поширені трубчасті теплообмінні апарати. Поверхня теплообміну таких апаратів складається із однієї або декількох труб. Найпростіший теплообмінник – типу труба в трубі – складається всього з однієї труби, яка всередині омивається одним теплоносієм, а ззовні – іншим, якій протікає в кільцевому просторі між теплообмінною трубою і кожухом. Якщо теплообмінник складається із декількох труб, то вони збираються в трубний пучок за допомогою трубних решіток. Труби з трубними решітками розміщують в кожусі.

При тепловому розрахунку рекуперативних теплообмінників з однофазними теплоносіями визначаються або площа поверхні теплообміну ( конструкторський розрахунок ), або кількість переданого тепла і кінцеві температури теплоносіїв ( перевірючий розрахунок). В основі теплового розрахунку теплообмінних апаратів лежать рівняння теплового балансу і теплопередачі.

При стаціонарному режимі роботи, якщо знехтувати втратами тепла в навколишнє середовище рівняння теплового балансу має



вигляд:

$$Q = G_{\varepsilon} \cdot \overline{c}_{p\varepsilon} \cdot T_{\varepsilon}' - T_{\varepsilon}'' = G_x \cdot \overline{c}_{px} \cdot T_x'' - T_x',$$

де  $G_{\varepsilon}, G_x$  - масові витрати гарячого і холодного теплоносіїв;  
 $\overline{c}_{p\varepsilon}, \overline{c}_{px}$  - середні значення масових ізобарних теплоємностей теплоносіїв;  
 $T_{\varepsilon}', T_x'$  - температури теплоносіїв на вході в апарат;  
 $T_{\varepsilon}'', T_x''$  - температури теплоносіїв на виході з апарата.

Рівняння теплопередачі запишеться:

$$Q = \kappa \cdot \Delta \overline{T} \cdot F$$

де  $\kappa$  - коефіцієнт теплопередачі;  $\Delta \overline{T}$  - середньологарифмічний температурний напір;  $F$  - площа поверхні теплообміну.

З рівняння теплопередачі при конструкторському розрахунку визначають площу поверхні теплообміну.

## 8.2 ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Експериментальна установка з ЕОМ та робочої ділянки.

Робоча ділянка (рис. 8.2) складається з внутрішньої трубки 1, по якій тече гарячий теплоносій, і концентрично розміщеної зовнішньої труби 2. В кільцевому зазорі тече холодний теплоносій. В якості теплоносіїв можна обирати повітря або воду.

Гарячий і холодний теплоносії надходять в теплообмінник, проходячи через регульовальні засувки 3 і 5 та діафрагми витратоміра 4 і 6 відповідно. Можлива подача гарячого і холодного теплоносіїв в одному напрямку за проточесною схемою і в протилежних напрямках за протитечесною схемою.

Передбачається вимірювання наступних параметрів: перепад тиску на діафрагмі гарячого теплоносія  $\Delta P_{\varepsilon}$ , перепад тиску на діафрагмі холодного теплоносія  $\Delta P_x$ , тиск перед діафрагмою гарячого теплоносія  $P_{\varepsilon}$ , тиск перед діафрагмою холодного теплоносія  $P_x$ , температура перед діафрагмою гарячого теплоносія  $E_{\varepsilon}$ , температура перед діафрагмою холодного теплоносія  $E_x$ , температура на вході гарячого теплоносія з теплообмінника  $E_{\varepsilon}'$ , температура на виході гарячого теплоносія з теплообмінника  $E_{\varepsilon}''$ , температура на вході холодного теплоносія з теплообмінника  $E_x'$ , температура на виході холодного теплоносія з теплообмінника  $E_x''$ .

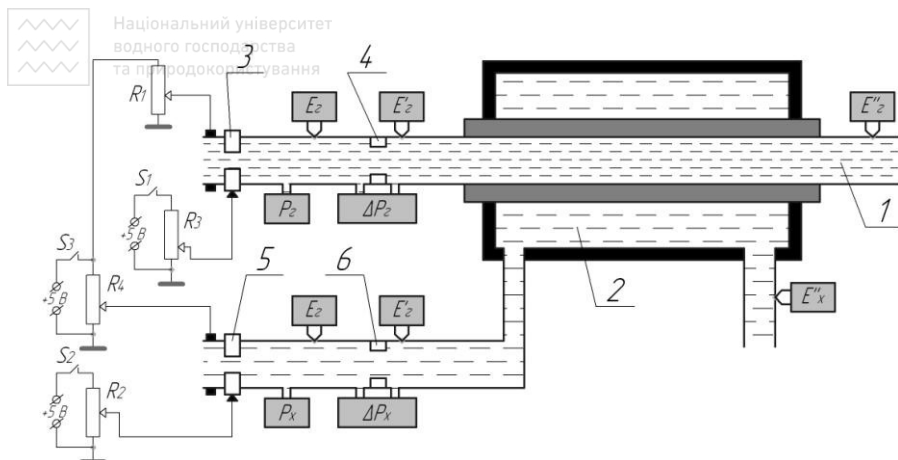


Рис. 8.2 – Схема робочої ділянки установки:

- 1 – внутрішня трубка; 2 – зовнішня труба; 3 – регулювальна засувка гарячого теплоносія; 4 – діафрагма витратоміра гарячого теплоносія;  
5 – регулювальна засувка холодного теплоносія;  
6 – діафрагма витратоміра холодного теплоносія

При дослідженні теплообмінного апарату можна змінювати його розміри (рис. 8.3) в наступних межах: внутрішній діаметр труби  $d_1=0,006...0,022$  м; зовнішній  $d_2=0,008...0,024$  м; внутрішній діаметр зовнішньої труби  $d_3=0,01...0,04$  м; довжина  $l=0,3...5$  м. При дослідженні теплообмінника, в якому на трубі розташовані кільцеві турбулізатори, необхідно також задати діаметр кільцевих діафрагм  $d'_1=(0,88...0,98) \cdot d_1$ , діаметр кільцевих канавок  $d'_2=(0,88...0,98) \cdot d_2$ , крок розміщення діафрагм і канавок  $t=(0,25...1) \cdot d_1$ .

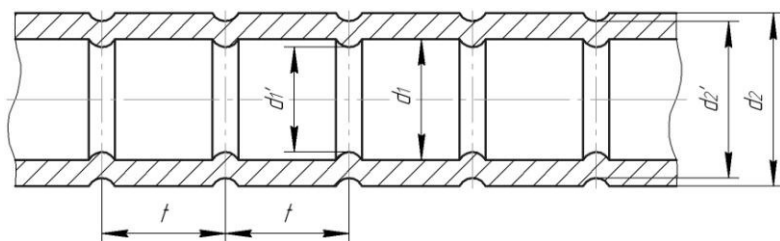


Рис. 8.3 – Профіль теплообмінної труби



### 8.3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Після запуску робочої програми, на комп'ютерному моніторі відображається тема лабораторної роботи і Ви вступаєте в діалог з комп'ютером. В процесі діалогу виконується наступна послідовність дій.

1 За допомогою клавіатури вводяться геометричні параметри теплообмінника ( $d_1, d_2, d_3, l, d_1', d_2', t$ ); вид теплоносія по гарячій і холодній стороні (вода або повітря); схема руху (прямотечійна або протитечійна).

2 На пульті установки вмикається тумблер живлення вимірювальних приладів.

3 За допомогою регулятора 5 встановлюється витрата холодного теплоносія шляхом зміни тиску перед діафрагмою 6. Значення тиску  $P_x$  і перепаду тисків  $\Delta P_x$  фіксуються на ЕОМ за допомогою індикаторних приладів.

4 За допомогою регулятора 3 встановлюється витрата гарячого теплоносія шляхом зміни тиску перед діафрагмою 4. Значення тиску  $P_2$  і перепаду тисків  $\Delta P_2$  фіксуються на ЕОМ за допомогою індикаторних приладів.

5 Задаємо значення температури гарячого теплоносія на вході в апарат в межах рекомендованих значень  $E_e' = 0 \dots 30$  мВ, потім задаємо значення температури холодного теплоносія на вході в теплообмінник в межах  $E_x' = 0 \dots 7$  мВ.

6 За допомогою цифрового індикатора через багатопозиційний перемикач визначається температура на виході з теплообмінника для гарячого  $E_e''$  і холодного  $E_x''$  теплоносіїв.

7 Результати вимірів записуються в протокол (табл. 8.1).

8 По закінченню експерименту виконується перевід всіх регулювальних органів у вихідне положення.

Таблиця 8.1.

Результати дослідів

Схема руху	Гарячий теплоносій	Холодний теплоносій	Геометричні параметри						
			$d_1$	$d_2$	$d_3$	$l$	$d_1'$	$d_2'$	$t$
			$M$						

Параметри тиску				Параметри температури					
$P_z$	$\Delta P_z$	$P_x$	$\Delta P_x$	$E_z$	$E'_z$	$E''_z$	$E_x$	$E'_x$	$E''_x$
$кгс/м^2$				$мВ$					

#### 8.4 ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТИВ ДОСЛІДУ

1 Покази термоЕРС кожного температурного датчика переводяться в градуси Цельсія за залежністю:

$$t_i = E_i / 0,0695. \quad (8.1)$$

2 Визначаються витрати гарячого і холодного теплоносіїв.

При використанні в якості теплоносія води, її витрата для гарячої і холодної сторони визначається за формулами:

$$G_{\bar{a}} = 0,0723 \cdot \sqrt{\Delta \bar{D}_{\bar{a}}}, \quad (8.2)$$

$$G_{\bar{o}} = 0,0723 \cdot \sqrt{\Delta \bar{D}_{\bar{o}}}, \quad (8.3)$$

де перепади тисків  $\Delta P_z$  і  $\Delta P_x$  виражені в  $кгс/м^2$ .

При використанні в якості теплоносіїв повітря, його витрати відповідно рівні:

$$G_{\bar{a}} = 0,472 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\rho_{\bar{a}} \cdot \Delta \bar{D}_{\bar{a}}} = 0,472 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{\bar{D}_{\bar{a}}}{R \cdot T_{\bar{a}}} \cdot \Delta \bar{D}_{\bar{a}}}, \quad (8.4)$$

$$G_{\bar{o}} = 0,472 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{\bar{D}_{\bar{o}}}{R \cdot T_{\bar{o}}} \cdot \Delta \bar{D}_{\bar{o}}}, \quad (8.5)$$

де  $\rho_{\bar{a}}$  - густина повітря перед діафрагмою,  $кг/м^3$ ;

$R=29,3 \text{ } кгм/(кг \cdot K)$  – газова постійна для повітря.

3 Визначаємо значення середньологарифмічного температурного напору.

Для прототечійної схеми:

$$\overline{\Delta \bar{O}} = \frac{\frac{\bar{O}'_{\bar{a}} - \bar{O}'_{\bar{o}}}{\bar{O}'_{\bar{a}} - \bar{O}'_{\bar{o}}} \cdot \frac{\bar{O}''_{\bar{a}} - \bar{O}''_{\bar{o}}}{\bar{O}''_{\bar{a}} - \bar{O}''_{\bar{o}}}}{\ln \frac{\bar{O}'_{\bar{a}} - \bar{O}'_{\bar{o}}}{\bar{O}''_{\bar{a}} - \bar{O}''_{\bar{o}}}}. \quad (8.6)$$

Для протитечійної схеми:



$$\overline{\Delta \dot{Q}} = \frac{\overline{\dot{Q}'_{\bar{a}} - \dot{Q}''_{\bar{o}}}}{\ln \frac{\dot{Q}'_{\bar{a}} - \dot{Q}''_{\bar{o}}}{\dot{Q}'_{\bar{a}} - \dot{Q}'_{\bar{o}}}}. \quad (8.7)$$

4 Визначаємо тепловий потік, який передається в апараті:

$$\overline{Q_{\bar{o}}} = G_{\bar{o}} \cdot \overline{c_{\bar{o}\bar{o}}} \cdot \overline{\dot{Q}'_{\bar{o}} - \dot{Q}''_{\bar{o}}}, \quad (8.8)$$

$$\overline{Q_{\bar{a}}} = G_{\bar{a}} \cdot \overline{c_{\bar{a}\bar{a}}} \cdot \overline{\dot{Q}'_{\bar{a}} - \dot{Q}''_{\bar{a}}}, \quad (8.9)$$

де теплоємності теплоносіїв  $\overline{c_{\bar{o}\bar{o}}}$  і  $\overline{c_{\bar{a}\bar{a}}}$  визначаються з додатків

Д1 і Д2 за середніми температурам  $\overline{T_{\bar{o}}} = 0,5 \cdot \overline{\dot{Q}'_{\bar{o}} + \dot{Q}''_{\bar{o}}}$  і  $\overline{T_{\bar{a}}} = 0,5 \cdot \overline{\dot{Q}'_{\bar{a}} + \dot{Q}''_{\bar{a}}}$  відповідно.

5 Визначаємо значення коефіцієнта теплопередачі.

Якщо холодний теплоносій має менший коефіцієнт тепловіддачі (холодний теплоносій – повітря), то

$$k = \frac{\overline{Q_{\bar{o}}}}{\overline{\Delta \dot{Q}} \cdot F_{\bar{o}}}, \quad (8.10)$$

Якщо гарячий теплоносій має менший коефіцієнт тепловіддачі, то:

$$k = \frac{\overline{Q_{\bar{a}}}}{\overline{\Delta \dot{Q}} \cdot F_{\bar{a}}}, \quad (8.11)$$

де  $F_{\bar{o}} = \pi \cdot d_2 \cdot l$ ,  $F_{\bar{a}} = \pi \cdot d_1 \cdot l$  - площа поверхні теплообміну,  $m^2$ .

Якщо коефіцієнти тепловіддачі приблизно однакові (для теплообмінників «вода-вода» або «повітря-повітря») поверхня теплообміну визначається по середньому діаметру.

6 Визначаємо повну теплоємність масової витрати теплоносіїв

$$\overline{C_{\bar{a}}} = G_{\bar{a}} \cdot \overline{\tilde{n}_{\bar{a}\bar{a}}}, \quad (8.12)$$

$$\overline{C_{\bar{o}}} = G_{\bar{o}} \cdot \overline{\tilde{n}_{\bar{o}\bar{o}}}. \quad (8.13)$$

7 Визначаємо коефіцієнт теплової ефективності теплообмінного апарату, як відношення дійсно переданого теплового потоку до максимального:

$$\eta = \frac{\overline{Q_{\bar{o}}}}{\overline{Q_{\bar{o}\bar{i}\bar{a}\bar{d}}}} = \frac{\overline{Q_{\bar{o}}}}{\overline{C_{\bar{o}} \cdot \overline{\dot{Q}'_{\bar{a}} - \dot{Q}'_{\bar{o}}}}}. \quad (8.14)$$



8 Визначасмо число одиниць переносу теплоти (безрозмірний коефіцієнт теплопередачі):

$$N = \frac{k \cdot F_{\delta}}{C_{\delta}}. \quad (8.15)$$

9 Результати розрахунку зводяться в таблицю 8.2.

Таблиця 8.2

Результати обробки дослідних даних

$T_z$	$T_z'$	$T_z''$	$T_x$	$T_x'$	$T_x''$	$G_z$	$G_x$	$\overline{\Delta\dot{O}}$
$K$	$K$	$K$	$K$	$K$	$K$	$\text{кг/с}$	$\text{кг/с}$	$K$

$\overline{c_{\delta\delta}}$	$Q_x$	$\overline{c_{\delta\alpha}}$	$Q_z$	$k$	$C_z$	$C_x$	$\eta$	$N$
$\frac{\ddot{A}\epsilon}{\hat{e}\hat{\alpha} \cdot \hat{E}}$	$Bm$	$\frac{\ddot{A}\epsilon}{\hat{e}\hat{\alpha} \cdot \hat{E}}$	$Bm$	$\frac{\hat{A}\dot{O}}{\hat{i}^2 \cdot \hat{E}}$	$Bm/K$	$Bm/K$	-	-

### 8.5 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Класифікація теплообмінних апаратів.
2. Що таке тепловий конструкторський розрахунок?
3. Що таке тепловий перевірочний розрахунок?
4. Рівняння теплового балансу теплообмінного апарату.
5. Рівняння теплопередачі.
6. Логарифмічний температурний напір для проточної, протитечійної і перехресної схем руху.
7. Порівняння проточної і протитечійної схем руху.



**Тема: ДОСЛІДЖЕННЯ МАСООБМІНУ МІЖ ПОВЕРХНЕЮ  
ВОДИ І ПОВІТРЯМ**

**Мета:** В практичних розрахунках навчитися визначати коефіцієнт масовіддачі при випаровуванні пари з поверхні води в повітря.

**9.1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ**

Подібно до теплообміну, масообмін може здійснюватися як молекулярною, так і конвекційною дифузією. Молекулярна дифузія – процес переносу маси, обумовлений тепловим рухом мікрочастинок речовини. Молекулярна дифузія, що викликана неоднорідним розподілом концентрацій компонентів суміші називається концентраційною дифузією. Молекулярна дифузія, що викликана неоднорідним розподілом температури, називається термодифузією (ефект Соре). Масообмін, обумовлений спільною дією конвекційного переносу маси речовини і молекулярною дифузією, називається конвекційним масообміном.

Маса даного компонента суміші, що проходить за одиницю часу через довільну поверхню, називається потоком маси. Потік маси, обумовлений молекулярною дифузією, називається дифузійним потоком маси. Щільність потоку маси  $j$  одного із компонентів в однорідній за температурою і за тиском макроскопічно нерухомій двокомпонентній суміші за рахунок молекулярної дифузії визначається законом Фіка

$$j = -D \frac{dc}{dn} \text{ або } j = -\rho \cdot D \frac{dC}{dn}, \quad \vec{e}_n / (i^2 \cdot \vec{n}), \quad (9.1)$$

де  $c$ ,  $\rho$  – концентрація речовини і густина середовища,  $\text{кг/м}^3$ ;

$C=(c/\rho)$  – відносна концентрація;

$D$  – коефіцієнт молекулярної дифузії даного компонента в середовищі, яке розглядається,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$n$  – нормаль до поверхні рівної концентрації.

Коефіцієнт дифузії – фізичний параметр, який має зміст коефіцієнта пропорційності при градієнті концентрації певного компонента суміші в рівнянні (3.1). В залежності від кількості компонентів суміші розглядають коефіцієнт дифузії бінарної суміші і коефіцієнт дифузії багатокомпонентної суміші. Для однокомпонентного сере-



довища застосовується термін самодифузії, що характеризує дифузіїю одних молекул середовища по відношенню до інших.

За наявності у середовищі різниці температур більш легкі молекули (які мають більшу рухомість) прагнуть перейти в область із більшою температурою, а важчі – в область із меншою температурою (термодифузія). наявність у нерухомому середовищі градієнта тиску призводить до переміщення важких молекул в область високого тиску, а легких – в область пониженого тиску (бародифузія).

Із урахуванням всіх трьох видів дифузії щільність потоку маси в загальному випадку

$$j_i = -\rho \left( D \nabla C_i + \frac{D_o}{T} \nabla T_i + \frac{D_a}{T} \nabla P \right). \quad (9.2)$$

В умовах одновимірної задачі

$$j_i = -\rho \left( D \frac{\partial C_i}{\partial n} + \frac{D_o}{T} \frac{\partial T_i}{\partial n} + \frac{D_a}{T} \frac{\partial P_i}{\partial n} \right). \quad (9.3)$$

де  $D$ ,  $D_o$  – коефіцієнти термодифузії і бародифузії;

$P$  – абсолютний тиск суміші, Па;

$T$  – температура суміші, К.

Конвекційна дифузія – процес перенесення маси за рахунок переміщення макроскопічних об'ємів речовини. Конвекційна дифузія завжди супроводжується дифузією молекулярною. Математичне описання процесу включає в себе систему диференціальних рівнянь:

- *Диференційне рівняння масовіддачі*

$$\beta = -\frac{D}{c_c - c_{ж}} \left( \frac{\partial c}{\partial n} \right)_{n=0}. \quad (9.4)$$

Рівняння (3.4) виражає умову масообміну на границі твердого тіла і середовища і дозволяє визначити коефіцієнт масовіддачі  $\beta$  за відомим полем температур у середовищі.

- *Диференційне рівняння енергії*

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial c}{\partial x} + w_y \frac{\partial c}{\partial y} + w_z \frac{\partial c}{\partial z} = \rho \left( D \nabla C_i + \frac{D_o}{T} \nabla T_i + \frac{D_a}{T} \nabla P \right). \quad (9.5)$$

Рівняння (3.5) описує масоперенесення у рухомій рідині і при постійних температурі і тискові (перенесення маси термодифузією і бародифузією відсутнє) набуває вигляду



$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial c}{\partial x} + w_y \frac{\partial c}{\partial y} + w_z \frac{\partial c}{\partial z} = \rho D \nabla^2 C_i. \quad (9.6)$$

Наведені рівняння, доповнені рівняннями руху і рівняннями суцільності, разом із умовами однозначності являють повне математичне описання процесу. Із його аналізу методами теорії подібності знаходяться (у вигляді рівнянь подібності) зв'язок між перемінними, що характеризують процес масовіддачі.

Для декотрого класу явищ тепловіддачі існує емпірична залежність

$$Nu = C \cdot Re^n \cdot Pr^m, \quad (9.7)$$

то для аналогічного класу явищ масовіддачі, якщо виконуються деякі передумови, буде справедливою залежність (із однаковими коефіцієнтом  $C$  і показниками  $n$  і  $m$ )

$$Nu_{di} = C \cdot Re^n \cdot Pr_{di}^m. \quad (9.8)$$

Ця обставина широко використовується у випадках дифузії в сумішах газів, що пояснюється близькістю значень  $Pr$  і  $Pr_{di}$ . В рідких розчинах  $Pr_{di} \gg Pr$ , що робить неможливим перенесення емпіричних залежностей одного процесу на інший.

Масообмін між поверхнею води, котра дотикається до парогазового середовища (повітря), визначається неоднаковістю температур води і повітря і неоднаковістю парціальних тисків водяної пари у повітря і біля границі поділу фаз.

## 9.2 ВИХІДНІ ДАНІ

- Температура повітря за сухим термометром  $t_c$ .
- Температура повітря за мокрим термометром  $t_m$ .
- Розміри поверхні води  $a \times b \times c$ .
- Температура поверхні води  $t_f$ .
- Різниця концентрацій водяної пари  $\Delta C$ .
- швидкість руху повітря  $w$ .

## 9.3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1 Маса води, що надходить у повітря з поверхні

$$M = \bar{\beta} \cdot F \cdot \Delta C, \quad (9.9)$$

де  $\Delta C$  – різниця концентрацій водяної пари;

$F$  – площа поверхні води.



2 Середній коефіцієнт масовіддачі  $\bar{\beta}$  у випадку вільного руху повітря визначається з рівняння ( $3 \cdot 10^6 \leq Ar \cdot Pr_o \leq 2 \cdot 10^8$ )

$$Nu_{\bar{a}} = 0,66 \cdot (Ar \cdot Pr_o)^{0,26}. \quad (9.10)$$

В якості визначального розміру прийнята менша сторона поверхні, в якості визначальної температури – середня температура в пограничному шарі.

3 В умовах вимушеного руху повітря для визначення середнього коефіцієнта масовіддачі використовуються залежності при  $Re = 3,15 \cdot 10^3 \dots 2,2 \cdot 10^4$

$$Nu_{\bar{a}} = 0,49 \cdot Re^{0,61} \cdot Pr_o^{0,33} \cdot Gu^{0,135} \cdot \theta^2; \quad (9.11)$$

при  $Re = 2,2 \cdot 10^4 \dots 3,15 \cdot 10^5$

$$Nu_{\bar{a}} = 0,0248 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr_o^{0,33} \cdot Gu^{0,135} \cdot \theta^2, \quad (9.12)$$

де  $Gu = \frac{\dot{Q}_{\bar{n}} - \dot{Q}_i}{\dot{Q}_{\bar{n}}}$  - число Гухмана, яке враховує вплив масообміну;

$\theta = \frac{\dot{Q}_{\bar{n}}}{\dot{Q}_f}$  - температурний фактор;

$T_c, T_m$  – абсолютна температура повітря за сухим та мокрим термометрами;

$T_f$  – абсолютна температура поверхні води.

В якості визначального розміру приймається довжина поверхні води в напрямку руху повітря.

4 Середній коефіцієнт масовіддачі визначається з залежності

$$\bar{\beta} = Nu_{\bar{a}} \frac{D}{l}, \quad (9.13)$$

де  $D = 21,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  – середній коефіцієнт дифузії водяної пари в повітрі.

## 9.4 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Молекулярна та конвекційна дифузії.
2. Що називається потоком маси? Закон Фіка.
3. Коефіцієнт дифузії. Його фізичний зміст.
4. Диференціальне рівняння масовіддачі.
5. Диференціальне рівняння енергії.
6. Основні числа подібності масообміну.



## ДОДАТОК

Таблиця Д1

Фізичні властивості води на лінії насичення

$t$ , °C	$\rho$ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$c_p$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\alpha \cdot 10^8$ , $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\mu \cdot 10^6$ , $\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$	$\nu \cdot 10^6$ , $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$Pr$
0	999,9	4,212	55,1	13,1	1788	1,789	13,67
10	999,7	4,191	57,4	13,7	1306	1,306	9,52
20	998,2	4,183	59,9	14,3	1004	1,006	7,02
30	995,7	4,174	61,8	14,9	801,5	0,805	5,42
40	992,2	4,174	63,5	15,3	653,3	0,659	4,31
50	988,1	4,174	64,8	15,7	549,4	0,556	3,54
60	983,2	4,179	65,9	16	469,4	0,478	2,98
70	977,8	4,187	66,8	16,3	406,1	0,415	2,55
80	971,8	4,195	67,4	16,6	355,1	0,365	2,21
90	965,3	4,208	68	16,8	314,9	0,326	1,95
100	958,4	4,22	68,3	16,9	282,5	0,295	1,75
110	951	4,233	68,5	17	259	0,272	1,6
120	943,1	4,25	68,6	17,1	237,4	0,252	1,47
130	934,8	4,266	68,6	17,2	217,8	0,233	1,36
140	926,1	4,287	68,5	17,2	201,1	0,217	1,26
150	917	4,313	68,4	17,3	186,4	0,203	1,17
160	907,4	4,346	68,3	17,3	173,6	0,191	1,1
170	897,3	4,38	67,9	17,3	162,8	0,181	1,05
180	886,9	4,417	67,4	17,2	153	0,173	1
190	876	4,459	67	17,1	144,2	0,165	0,96
200	863	4,505	66,3	17	136,4	0,158	0,93
210	852,8	4,555	65,5	16,9	130,5	0,153	0,91
220	840,3	4,614	64,5	16,6	124,6	0,149	0,89
230	827,3	4,681	63,7	16,4	119,7	0,145	0,88
240	813,6	4,756	62,8	16,2	114,8	0,141	0,87
250	799	4,844	61,8	15,9	109,9	0,137	0,86
260	784	4,949	60,5	15,6	105,9	0,135	0,87
270	767,9	5,07	59	15,1	102	0,133	0,88
280	750,7	5,23	57,4	14,6	98,1	0,131	0,9
290	732,3	5,485	55,8	13,9	94,2	0,129	0,93
300	712,5	5,736	54	13,2	91,2	0,128	0,97
310	691,1	6,071	52,3	12,5	88,3	0,128	1,03
320	667,1	6,574	50,6	11,5	85,3	0,128	1,11
330	640,2	7,244	48,4	10,4	81,4	0,127	1,22
340	610,1	8,165	45,7	9,17	77,5	0,127	1,39
350	574,4	9,504	43	7,88	72,6	0,126	1,6
360	528	13,984	39,5	5,36	66,7	0,126	2,35
370	450,5	40,321	33,7	1,86	56,9	0,126	6,79



Фізичні параметри сухого повітря  
при  $B=10,13 \cdot 10^4 \text{ Па}$  (760 мм.рт.ст.)

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$c_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\alpha \cdot 10^6, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\mu \cdot 10^6, \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$	$\nu \cdot 10^6, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Pr
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,17	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,1	17,66	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,15	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,64	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,13	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,62	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,11	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,97	28,6	20,60	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,09	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,48	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,88	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,86	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,74	27,8	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,52	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,31	32,49	0,681
200	0,776	1,026	3,93	51,4	26,00	34,85	0,680
250	0,674	1,058	4,27	61,0	28,40	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,70	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,40	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,00	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,39	0,699

## ЛІТЕРАТУРА

1. Погорелов А. І. Тепломасообмін (основи теорії та розрахунку) : навчальний посібник для вузів. Львів: "Новий Світ-2000", 2006. 144 с.
2. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент. Справочник. М.: Энергоиздат, 1982. 512 с.
3. Константінов С. М. Тепломасообмін : підручник. К.: ВПІ ВПК "Політехніка": Інрес, 2005. 304 с.: іл.