

МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра „Теплотехніка та теплові двигуни”

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВІДДАЧІ ПРИ
ПОПЕРЕЧНОМУ ОБТІКАННІ ТРУБ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторної роботи з дисципліни

“ТЕПЛОМАСООБМІН”

Харків - 2009

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри “Теплотехніка та теплові

двигуни” 29 вересня 2008 р., протокол № 3.

Розглядається практичний метод визначення коефіцієнта тепловіддачі при поперечному обтіканні пучків труб, а також обробка дослідних даних на основі теорії подібності.

Методичні вказівки призначені для студентів спеціальності «Теплоенергетика», що вивчають курс «Тепломасообмін», денної та заочної форм навчання.

Укладачі:

доц. Є.В. Богомазов,
асист. О.В. Панчук

Рецензент

доц С.В. Угольніков

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВІДДАЧІ ПРИ
ПОПЕРЕЧНОМУ ОБТІКАННІ ТРУБ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторної роботи з дисципліни
“ТЕПЛОМАСООБМІН”

Відповідальний за випуск Богомазов Є.В.

Редактор Еткало О.О.

Підписано до друку 30.10.08 р.
Формат паперу 60x84 1/16 . Папір писальний.
Умовн.-друк.арк. 1,0. Обл.-вид.арк. 1,25.
Замовлення № Тираж 100. Ціна

Видавництво УкрДАЗТу, свідоцтво ДК 2874 від 12.06.2007 р.
Друкарня УкрДАЗТу,
61050, Харків - 50, майд. Фейербаха, 7

**УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра “Теплотехніка та теплові двигуни”

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВІДДАЧІ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМУ
ОБТІКАННІ ТРУБ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторної роботи
з дисципліни**

“ТЕПЛОМАСООБМІН”

Харків – 2009

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри “Теплотехніка та теплові двигуни” 29 вересня 2008 р., протокол № 3.

Розглядається практичний метод визначення коефіцієнта тепловіддачі при поперечному обтіканні пучків труб, а також обробка дослідних даних на основі теорії подібності.

Методичні вказівки призначені для студентів спеціальності «Теплоенергетика», що вивчають курс «Тепломасообмін», денної та заочної форм навчання.

Укладачі:

доц. Є.В. Богомазов,
асист. О.В. Панчук

Рецензент

доц С.В. Угольніков

Мета роботи: поглиблення знань з теорії тепловіддачі при поперечному обтіканні труб, ознайомлення з методикою дослідного визначення процесу та набуття навичок у проведенні експерименту та обробці дослідних даних на основі теорії подібності.

Завдання:

- експериментально визначити значення коефіцієнта тепловіддачі для різних рядів труб та в середньому для пучка труб;
- встановити залежність коефіцієнтів тепловіддачі від температурного напору теплоносіїв;
- опрацювати результати дослідів та подати їх у загальному критеріальному вигляді;
- скласти звіт про виконану роботу.

ОПИС МЕТОДИКИ ТА ДОСЛІДНОЇ УСТАНОВКИ

У техніці часто зустрічаються два загальних типи трубних пучків: *шаховий* та *коридорний* (рисунок 1).

Характеристиками пучка є зовнішній діаметр труб d та відносні *поперечний* та *повздовжній* кроки S_1/d , S_2/d , де S_1 – поперечний крок труб (відстань між осями труб у напрямку, перпендикулярному потоку рідини); S_2 – повздовжній крок труб (відстань між осями сусідніх двох рядів у напрямку руху рідини). Окрім цього, на інтенсивність тепловіддачі впливає кількість рядів труб за ходом руху рідини. Вплив компонування на інтенсивність тепловіддачі зменшується зі збільшенням швидкості. Перші ряди труб є турбулізаторами для наступних рядів, тому тепловіддача глибинних рядів зазвичай вища, ніж перших. Починаючи з третього ряду, турбулентність потоку набуває стабільного характеру, характерного даному компонуванню пучка. У зв'язку з цим максимальну кількість

теплоти сприймають третій та наступні ряди трубок за ходом руху рідини [1].

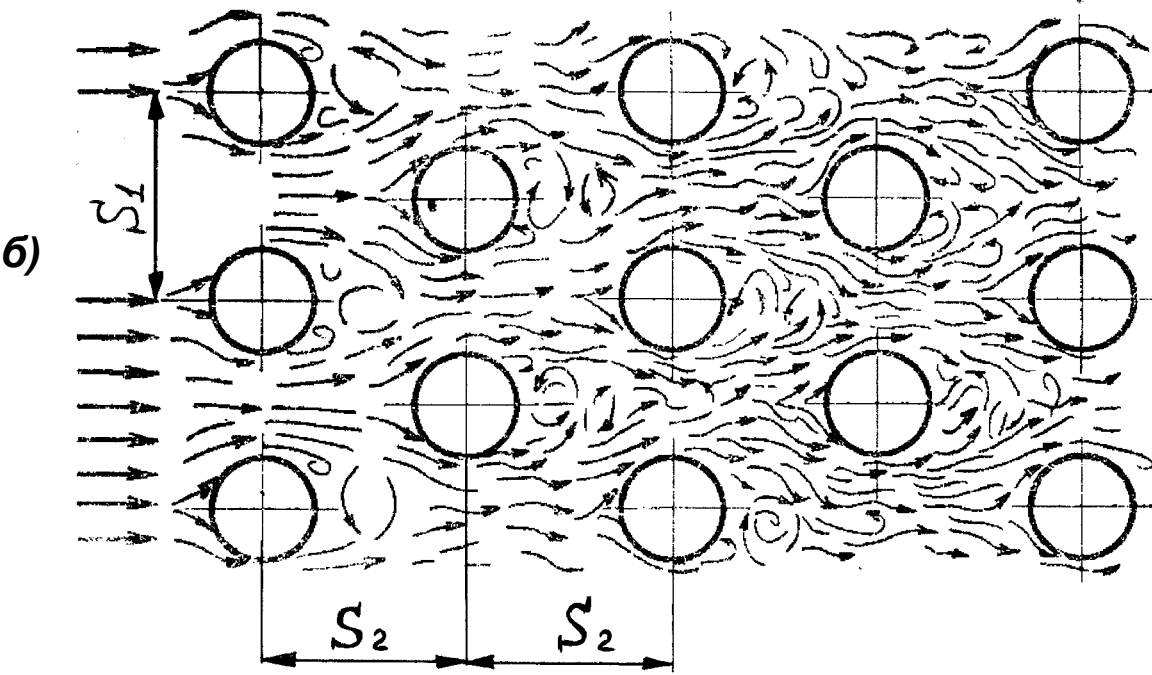
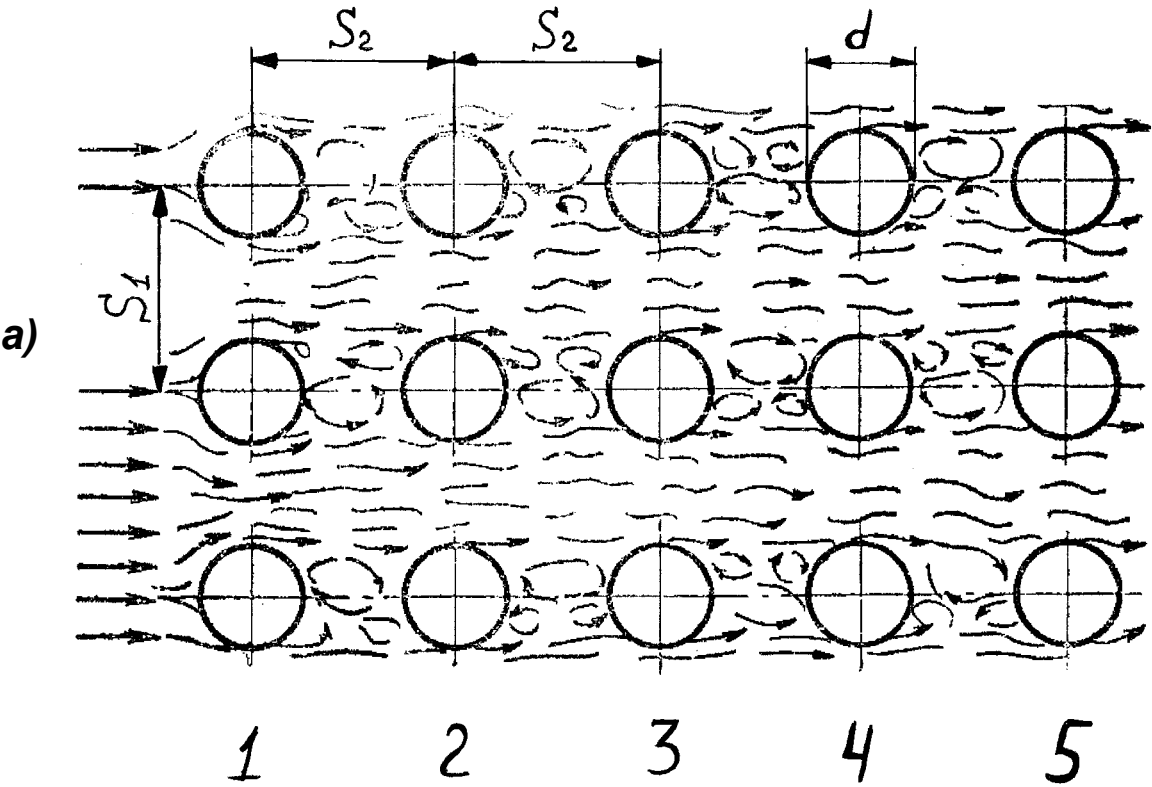


Рисунок 1 – Схеми розташування труб в коридорних (а) і шахових (б) пучках труб та характер плинину рідини в них

Експериментальні дослідження показують: якщо тепловіддачу третього пучка прийняти за 100 %, то в шахових та коридорних пучках тепловіддача першого ряду складає лише 60 %, а другого в коридорних пучках – близько 90 %, в шахових – близько 70 %. За абсолютним значенням тепловіддача в шахових пучках вища, ніж в коридорних, що пояснюється кращим перемішуванням рідини, яка обтікає труби зовні.

Результати досліджень тепловіддачі при поперечному обтіканні пучків труб опрацьовують на основі теорії подібності та подають зазвичай критеріальними рівняннями, які мають такий вигляд

$$Nu_{d,ж} = c \cdot Re_{d,ж}^b \cdot Pr_{ж}^m \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^k \cdot \varepsilon_i \cdot \varepsilon_s, \quad (1)$$

де c , b , m , k – коефіцієнти, які залежать від значення та компонування пучка;

$\varepsilon_i, \varepsilon_s$ – поправочні коефіцієнти враховують відповідно різницю в коефіцієнті тепловіддачі за рядами пучка та вплив відносних кроків.

Індекси "d" та "ж" при критеріях подібності у рівнянні (1) означають, що в ролі визначального розміру приймається зовнішній діаметр труби d , а в ролі визначальної температури – середня температура рідини, яка обтікає пучок труб зовні.

Індекс "с" показує, що значення Pr для рідини обирається при температурі стінки (зовнішньої поверхні труб).

При поперечному обтіканні труб повітрям отримані такі критеріальні рівняння (для повітря $Pr \approx 0,7$ та практично не залежить від температури) [2]:

а) коридорні пучки труб:

$$\text{при } Re_{d,ж} < 10^3 \quad Nu_{d,ж} = 0,49 Re_{d,ж}^{0,5}; \quad (2)$$

$$\text{при } Re_{d,ж} > 10^3 \quad Nu_{d,ж} = 0,194 Re_{d,ж}^{0,65}; \quad (3)$$

б) шахові пучки труб:

$$\text{при } Re_{d,ж} < 10^3 \quad Nu_{d,ж} = 0,49 Re_{d,ж}^{0,5}; \quad (4)$$

$$\text{при } Re_{d,ж} > 10^3 \quad Nu_{d,ж} = 0,35 Re_{d,ж}^{0,6}. \quad (5)$$

В цих формулах значення критерію Рейнольдса

$$Re_{d,ж} = \frac{W \cdot d}{\nu_{ж}}, \quad (6)$$

де W – швидкість плинину рідини (повітря), яка обтікає труби зовні, в найбільш вузькому перерізі, м/с;

$\nu_{ж}$ – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря при його середній температурі (див. додаток А), м²/с;

d – зовнішній діаметр труб, м.

Формули отримані для третього та наступних рядів труб, тоді коефіцієнт тепловіддачі для цих рядів

$$\bar{\alpha}_3 = \frac{Nu_{d,ж} \cdot \lambda_{ж}}{d}, \quad (7)$$

де, $\lambda_{ж}$ – коефіцієнт теплопровідності повітря при його середній температурі (дивись додаток), Вт/(м °С).

Значення $\bar{\alpha}$ для трубок першого ряду пучка визначається шляхом помноження знайденого значення $\bar{\alpha}$ для третього ряду на поправочний коефіцієнт $\varepsilon_1 = 0,6$.

Для трубок другого ряду в коридорних пучках $\varepsilon_2 = 0,9$, в шахових – $\varepsilon_2 = 0,7$.

Середній коефіцієнт тепловіддачі для всього пучка визначається за формулою

$$\bar{\alpha} = \frac{\bar{\alpha}_1 \cdot F_1 + \bar{\alpha}_2 \cdot F_2 + \dots + \bar{\alpha}_n \cdot F_n}{F_1 + F_2 + \dots + F_n}, \quad (8)$$

де $\bar{\alpha}_1, \bar{\alpha}_2, \dots, \bar{\alpha}_n$ – середні значення коефіцієнтів тепловіддачі відповідно 1^{го}, 2^{го}, ... n^{го} рядів;

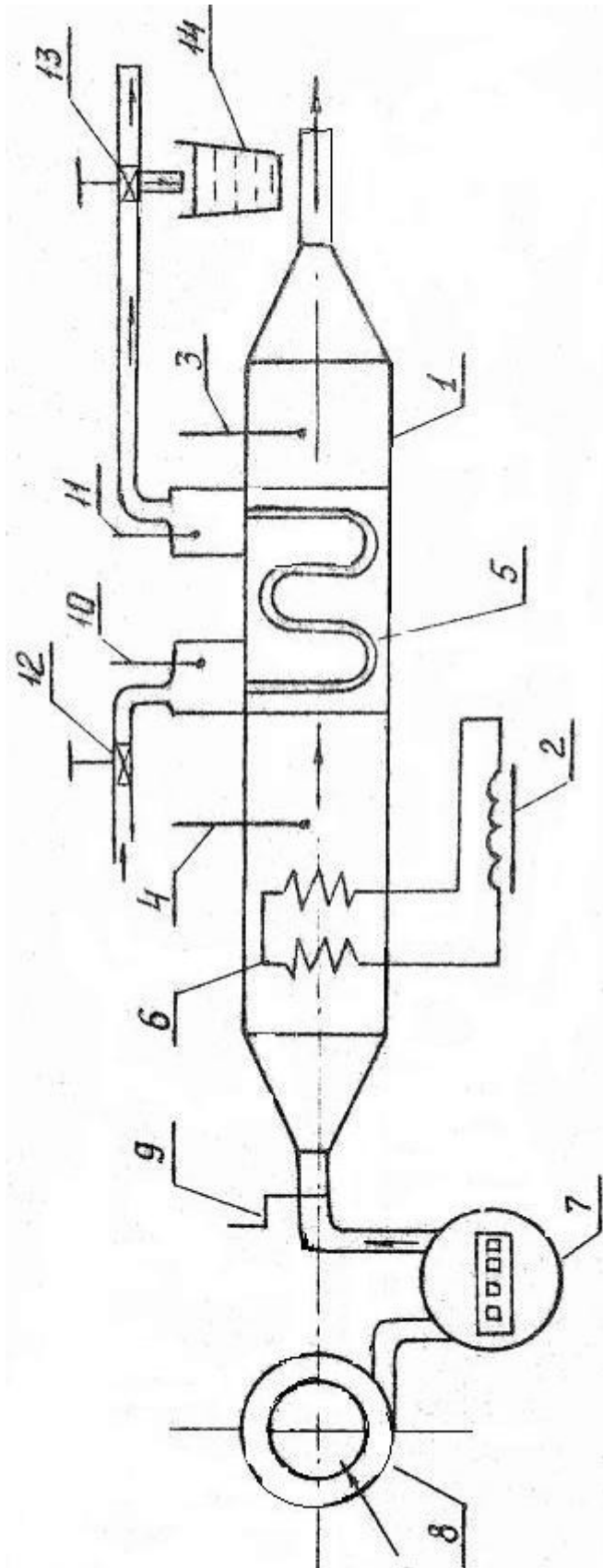
F_1, F_2, \dots, F_n – сумарні поверхні тепловіддачі відповідно 1^{го}, 2^{го}, ... n^{го} рядів.

Співвідношення (2) ... (5) справедливі у випадках, коли потік рідини перпендикулярний вісі пучка, тобто коли кут атаки $\psi=90^\circ$.

Схема дослідної установки для дослідження тепловіддачі при поперечному обтіканні пучків труб наведена на рисунку 2.

Дослідна установка розташована у *металевому корпусі* (1), через який подається повітря за допомогою *вентилятора* (8). Витрата повітря визначається за показниками *газового лічильника* (7) або за паспортними даними вентилятора. Для регулювання витрати повітря, яке подається за допомогою вентилятора, а отже, швидкості повітря служить *регулююча заслінка (шибер)* (9).

Для підігріву повітря в установці може бути встановлений *підігрівач* (6), потужність якого регулюється *автотрансформатором* (2). По ходу руху повітря в корпусі встановлений *коридорний або шаховий пучок труб* (5). Температура повітря перед пучком труб фіксується *термометром* (4), а за ним – *термометром* (3).



Для регулювання температури поверхні трубок пучка та для

створення температурного напору між повітрям і трубками через останні пропускається холодна або гаряча вода. При проходженні холодної води відбувається її нагрівання підігрітим нагрівачем повітрям. При використанні гарячої води відбувається її охолодження холодним повітрям (потужність нагрівача дорівнює нулю. Температура води на вході в пучок фіксується *термометром* (10), на виході – *термометром* (11).

Для заміру витрати води використовується *мірна ємкість* (14), куди вода потрапляє через *триходовий кран* (13), встановлений на виході з пучка. Витрата води через пучок регулюється *вентилем* (12).

Геометричні розміри металевго корпуса та характеристики пучка труб подано на рисунках 2 і 3 та у таблиці 1.

Таблиця 1 – Геометричні розміри металевго корпуса та характеристики пучка труб

Величина	Коридорне розташування	Шахове розташування
1 Ширина металевго каркаса В, м	0,27	
2 Довжина металевго каркаса Н, м	0,22	
3 Зовнішній діаметр трубки d , м	0,012	
4 Висота трубок в пучку h , м	0,17	
5 Кількість трубок в першому ряді Z_1 , шт.	4	
6 Сумарна довжина всіх труб пучка l_c , м	0,308	0,3

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Перед проведенням експерименту необхідно перевірити правильність складання установки та з'єднання електричних приладів. Після перевірки установки викладачем можна приступати до виконання роботи.

Увімкнути *вентилятор* (8) та з допомогою *шибера* (9) встановити витрату повітря. За допомогою *вентиля* (12) встановити довільну витрату води.

Всі виміри виконуються на сталому тепловому режимі, який характеризується незмінністю за часом температур повітря та води на вході і виході з пучка, отже, витрати теплоносіїв через пучок.

Вимірюються такі величини:

- витрата повітря через установку за час $T_{\text{пов}} - Vc, \text{ м}^3/\text{год}$;
- витрата води через пучок за час $T_{\text{вод}} - Gc, \text{ м}^3/\text{год}$;
- температура повітря перед пучком $t'_{\text{пов}}, \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура повітря за пучком $t''_{\text{пов}}, \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура води перед пучком $t'_{\text{вод}}, \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура води за пучком $t''_{\text{вод}}, \text{ }^\circ\text{C}$;
- барометричний тиск повітря $B_0, \text{ мм рт. ст.}$.

Дані експерименту заносяться до таблиці 2.

Таблиця 2 – Експериментальні дані

	$V_{\text{пов}}, \text{ м}^3$	$T_{\text{пов}}, \text{ с}$	$G_{\text{вод}}, \text{ л}$	$T_{\text{вод}}, \text{ с}$	$t'_{\text{пов}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t''_{\text{пов}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t'_{\text{вод}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t''_{\text{вод}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$B_0, \text{ мм рт. ст.}$
1									
2									
3									
...									
n									

ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Для кожного сталого режиму визначають:

- секундну витрату повітря, м³/с

$$V_c = \frac{V_{нов}}{\tau_{нов}};$$

- секундну витрату води, м³/с

$$G_c = \frac{G_{вод}}{\tau_{вод}};$$

- середню швидкість руху повітря в найбільш вузькому перерізі пучка площею ($F_{в\dot{y}z}$), м/с

$$W = \frac{V_c}{F_{в\dot{y}z}},$$

де $F_{в\dot{y}z} = B \cdot H - h \cdot d \cdot z_1$,

B, H – відповідно ширина та висота металевого каркаса, м
(рисунок 2);

h – висота трубок в пучку, м;

d – діаметр трубки, м;

z_1 – кількість трубок в першому ряду, шт.

Маючи попередньо обчислені дані можна визначити значення критерію Рейнольда

$$Re_{d,ж} = \frac{W \cdot d}{\nu_{ж}}$$

Середня температура повітря $\bar{t}_{нов}$, °С

$$\bar{t}_{нов} = \frac{t'_{нов} + t''_{нов}}{2}.$$

Кількість теплоти, якою обмінюються теплоносії, Вт

$$Q = C_{p_{\text{вод}}} \cdot G_c \cdot \Delta t_{\text{вод}}$$

де $C_{p_{\text{вод}}} = 4190$ Дж/(кг К) – масова ізобарна теплоємність води;
 $\Delta t_{\text{вод}}$ - різниця температур води на вході та виході з пучка труб;

$$\Delta t_{\text{вод}} = t''_{\text{вод}} - t'_{\text{вод}} \text{ – при нагріванні води;}$$

$$\Delta t_{\text{вод}} = t'_{\text{вод}} - t''_{\text{вод}} \text{ – при охолодженні води.}$$

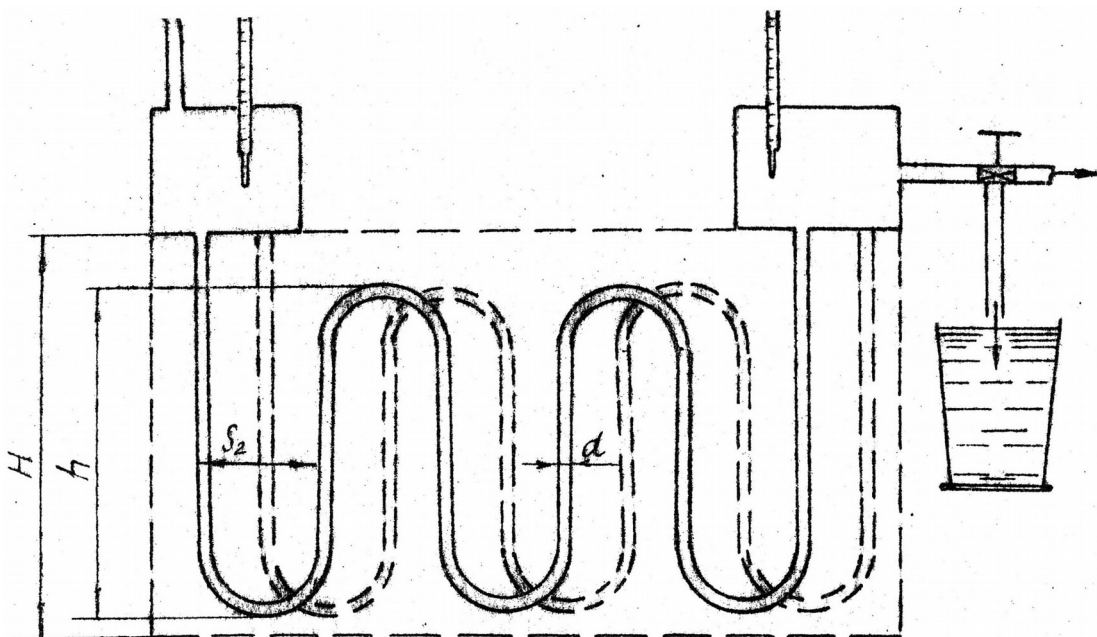


Рисунок 3 – Пакет з пучком труб

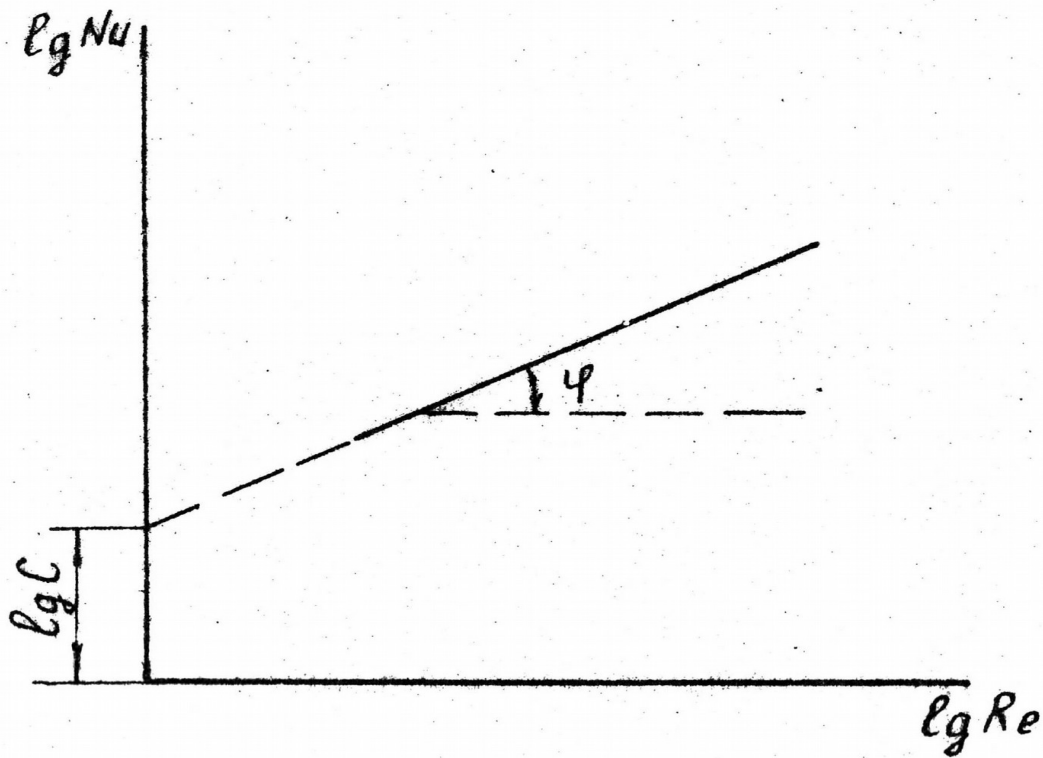


Рисунок 4 – Графічний засіб встановлення ступеневої залежності між змінними

Середнє значення коефіцієнта тепловіддачі для пучка труб визначається за залежністю Ньютона – Ріхмана, Вт/(м² К)

$$\bar{\alpha} = \frac{Q}{F_{зм} \cdot \Delta t},$$

де $F_{зм}$ – сумарна площа зовнішньої поверхні всіх труб пучка, м²

$$F_{зм} = \pi \cdot d \cdot l_c,$$

де l_c – сумарна довжина всіх труб пучка, м;

Δt – середній температурний напір теплоносіїв (можна визначати як середньоарифметичний температурний напір).

У зв'язку з тим, що коефіцієнт тепловіддачі з боку води непомірно більший, ніж з боку повітря, а термічний опір матеріалу стінок труб нехтовно малий, з достатньою для

практики точністю можна вважати, що температура зовнішньої поверхні труб (стінки) дорівнює температурі води. Тоді,

$$\Delta t = |\bar{t}_c - \bar{t}_{нос}|,$$

де \bar{t}_c – середня температура стінки труби, °С.

$$\bar{t}_c = \frac{t_{вод}'' - t_{вод}'}{2}.$$

Результати первинної обробки експериментальних даних подаються у вигляді графічної залежності

$$\bar{\alpha} = f(\Delta t).$$

Середнє значення коефіцієнтів тепловіддачі для третього та наступних рядів:

- для коридорного пучка труб

$$\bar{\alpha}_3 = \frac{\bar{\alpha} \cdot n}{n - 0,5}$$

- для шахового пучка труб

$$\bar{\alpha}_3 = \frac{\bar{\alpha} \cdot F_{3m}}{0,6 \cdot F_1 + 0,7 \cdot F_2 + F_3 + \dots + F_n}.$$

де $F_1, F_2, F_3 \dots F_n$ – сумарні поверхні тепловіддачі відповідно 1^{го}, 2^{го}, 3^{го} ... n^{го} рядів.

Маючи ці дані, визначають значення критерію Нусельта для третього та наступних рядів

$$Nu_{d,ж} = \frac{\bar{\alpha}_3 \cdot d}{\lambda_{ж}},$$

де $\lambda_{ж}$ – коефіцієнт теплопровідності повітря, м²/с, визначається за таблицями фізичних властивостей повітря (див.

додаток А) за його середньою температурою $\bar{t}_{нов}$.

Критеріальне рівняння при поперечному обтіканні повітрям пучка труб має вигляд

$$Nu_{d,ж} = c \cdot Re_{d,ж}^b.$$

Шукані сталі c та b легко визначити, якщо подати результати експерименту в логарифмічній системі координат (логарифмічній анаморфозі), в якій ступеневе рівняння $Nu_{d,ж} = c \cdot Re_{d,ж}^b$ відображається прямою лінією. За графіком легко знаходиться значення b , як відношення катетів, тобто (рисунок 3)

$$b = \operatorname{tg} \varphi,$$

а значення c визначається за співвідношенням

$$c = \frac{Nu_{d,ж}}{Re_{d,ж}^b}.$$

Отримані значення c та b порівнюються з наведеними в формулах (2)...(5) для коридорного та шахового пучка труб та відповідними значеннями $Re_{d,ж}$.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

- 1 Які типи трубних пучків Ви знаєте?
- 2 Як змінюються інтенсивність тепловіддачі рядів труб за ходом руху рідини, що обтікає?
- 3 Який вигляд мають критеріальні рівняння при поперечному обтіканні пучка труб?
- 4 Які величини вимірюють при проведенні лабораторної роботи і з якою метою?
- 5 Опишіть схему лабораторної установки.
- 6 Наведіть послідовність виконання роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. – 417 с.

2 Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

3 Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. – М.: Энергия, 1979. – 320 с.

Додаток А

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

t , °С	ρ , кг/м ³	C_p , кДж/(кг°С)	λ 10 ² , Вт/(м °С)	a 10 ⁶ , м ² /с	μ 10 ⁶ , Па с	ν 10 ⁶ , м ² /с	Pr
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696

