

## Лабораторна робота № 11

### Тепловіддача при вимушеному русі повітря в трубі

**Зміст роботи.** Визначення локальних і середнього значень коефіцієнта тепловіддачі при русі повітря в трубі. Оцінка за даними експерименту довжини ділянки теплової стабілізації. Дослідження впливу швидкості повітря на коефіцієнт тепловіддачі. Представлення результатів експерименту на стабілізованій ділянці в критерійні форми і порівняння з відомими в літературі критерійними залежностями.

**Опис експериментальної установки.** Робоча ділянка установки (мал. 10.6) є трубкою 2 з неіржавіючої сталі (розміри її вказані на малюнку). Один кінець трубки сполучений з атмосферою, а інший – шлангом з відцентровим вентилятором.

Опори 1, 3, в яких закріплена трубка, виготовлені з фторопласту. Вони тепло- і електроізолюють трубку 2 від решти елементів конструкції. На кінцях трубки припаяні мідні шайби, до яких від знижувального трансформатора підводиться електричний струм низької напруги для нагрівання робочої ділянки. Електричний опір трубки складає 0,0344 Ом.

На мал. 10.7 показана схема вимірювань. Напруга в ланцюзі нагрівача регулюється автотрансформатором ЛАТР-2М—2А і реєструється цифровим комбінованим приладом Щ-4313—26. Температура стінки трубки вимірюється десятьма термопарами ТХК 1-3а—10-3а, гарячі спаї яких припаяні до її назовнішньої поверхні. Координати гарячих спаїв термопар, відлічувані від входу, приведені нижче:

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$x_i$	25	45	85	155	250	370	490	610	695	715
$L_i$	25	30	55	82,5	107,5	120	120	102,5	52,5	25

де  $i$  — номер термопари;  $x_i$  — координата гарячого спаю;  $L_i$  — довжина ділянки труби, відповідного  $i$ -й термопарі (див. мал. 10.6).

Термопарами 12-3а і 11-3а вимірюється температура на вході і виході з трубки відповідно. Для перемішування повітря перед термопарою 11-3а встановлена сітка 4 (див. мал. 10.6). Номери термопар, вказані на схемі вимірювань, відповідають позиціям на перемикачі 36. Термо-ЕРС термопар вимірюється мілівольтметром МВУ6-41А—3в з автоматичною компенсацією температури холодних спаїв.

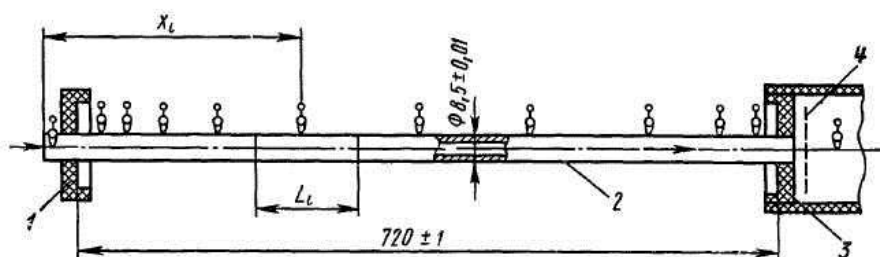


Рис. 10.6 Робоча ділянка установки ТП-3

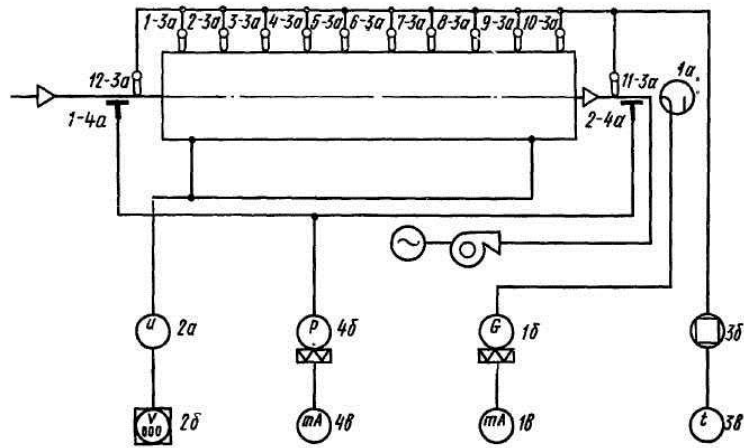


Рис. 10.7 Схема вимірювань

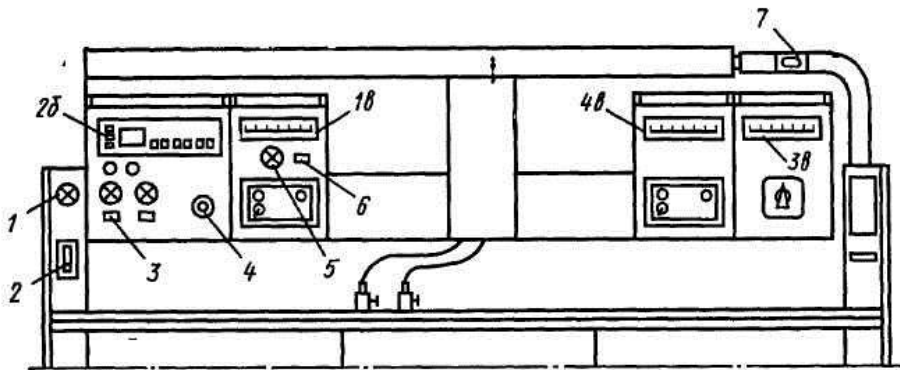


Рис. 10.8 Загальний вигляд установки

Швидкість повітря в робочій ділянці вимірюється трубкою Піто *1а* в комплекті з диференціальним манометром ДМ-ЭР2—*1б*, посилений електричний сигнал якого реєструється міліамперметром М1730—*1в*. За допомогою другого дифманометра ДМ-ЭР2 — *4б*, сигнал з якого поступає на міліамперметр М1730—*4в*, вимірюється падіння тиску на робочій ділянці.

Регулювання швидкості повітря здійснюється зміною частоти обертання електродвигуна вентилятора регулятором напруги, а також за допомогою заслінки, що забезпечує підсос повітря через отвір в трубопроводі, що сполучає вентилятор з робочою ділянкою.

На мал. 10.8 показаний загальний вид установки із вказівкою розташування органів регулювання і вимірювання.

**Порядок проведення досвіду.** Переконавшись, що ручки регуляторів напруги 4 і 5 на панелі приладів (мал. 10.8) виведені проти годинникової стрілки до упору. Тумблером 2 на панелі управління включити установку в мережу (спалахує контрольна лампочка 1).

Включити відцентровий вентилятор натисненням тумблера 6 і за допомогою регулятора частоти обертання електродвигуна 5 і заслінки 7 встановити перепад тиску  $\Delta p = 71$  мм вод. ст., вимірюваний дифманометром, покази якого в мм вод. ст. прочитуються з міліамперметра *1в*.

Тумблером 3 включити ланцюг нагрівання робочої ділянки і встановити за допомогою ручки автотрансформатора 4 падіння напруги, не перевищуюче 1,5 В, яке вимірюється цифровим вольтметром 2б.

Переконавшись в настанні стаціонарного теплового режиму за

стабільністю показів термопар, записати покази всі 12 термопар по мілівольтметру 3в, шкала якого градуйована в °С.

Мембранним дифманометром, електричний сигнал з якого подається на міліамперметр 1в, градуйований в мм вод. ст., зміряти динамічний натиск  $\Delta p$ , що показується трубкою Піто, а дифманометром блоку тиску по міліамперметру 4в зміряти падіння тиску  $\Delta h$  по довжині робочої ділянки.

За допомогою цифрового вольтметра 2б виміряти падіння напруги на робочій ділянці, а барометром – тиск навколишнього середовища.

Результати вимірювань занести в журнал спостережень формою:

$\Delta p$		$\Delta h$		Покази термопар, °З												
ММ ВОД. СТ.	П а	ММ ВОД. СТ	П а	$t_{cm1}$	$t_{cm2}$	$t_{cm3}$	$t_{cm4}$	$t_{cm5}$	$t_{cm6}$	$t_{cm7}$	$t_{cm8}$	$t_{cm9}$	$t_{cm10}$	$t_{cm11}$	$t_{cm12}$	

Вимірювання повторити на витратах повітря, відповідних динамічному тиску 120 і 200 мм вод. ст., реєстрованому трубкою Піто.

Після закінчення досліду повернути ручку автотрансформатора 4 проти годинникової стрілки до упору, при цьому цифровий вольтметр 2б повинен показувати нульове значення напруги. Після того як робоча ділянка охолонуть до температури навколишнього середовища, вимкнути тумблером 6 відцентровий вентилятор.

**Обробка результатів вимірювань.** Критерійне рівняння 1 (10.11) для визначення коефіцієнта тепловіддачі при вимушеному квазіізотермічному ( $T_{\text{нв}}/T_e \approx 1$ ) турбулентному рухові рідини ( $Re \geq 10^4, Pr_e \geq 0,7$ ) на основній ділянці (ділянці стабілізованої течії) труби має вигляд

$$Nu_e = 0,021 Re_e^{0,8} Pr_e^{0,43}. \quad (5.14)$$

При меншому значенні числа  $Re_e$  тобто в так званій перехідній області течії ( $2300 \leq Re_e \leq 10^4$ ), тепловіддача може бути розрахована по наступній залежності:

$$Nu_e = f(Re_e) Pr_e^{0,48}, \quad (5.15)$$

де  $f(Re_e)$  — функція, залежна від  $Re_e$

$Re_e$	2300	2500	3000	3500	4000	5000	6000	7000	8000	3000	$>10^4$
$f(Re_e)$	3,6	4,9	7,5	10	12,2	16,5	20	24	27	30	

При обчисленні критеріїв подібності  $Nu_e = \alpha d / \lambda_e, Re = \bar{w} d / \nu_e, Pr_e = \nu_e / a_e$ , що входять в рівняння (5.14), (5.15), визначального розміру приймають як діаметр труби  $d$ , а як визначальна температура — середню температуру рідини  $t_e$ ;  $\bar{w}$  — середня швидкість, м/с.

Для представлення одержаних експериментальних даних в критерійній формі необхідно:

1. Визначити тепловий потік  $Q$  (Вт) на робочій ділянці за формулою
$$Q = U^2 / R_e, \quad (5.16)$$

де  $R_e$  — опір робочої ділянки, Ом.

2. Підрахувати масову витрату повітря за показами трубки Піто

$$M = \xi F \sqrt{2\rho\Delta p},$$

де  $\Delta p$  — динамічний натиск, вимірюваний трубкою Піто, Па;  $\rho = p/[R(t_{11} + 273)]$  — густина повітря у вимірювальному перетині, кг/м<sup>3</sup>;  $p = B - \Delta h$  — абсолютний тиск повітря у вимірювальному перетині, Па;  $B$  — барометричний тиск, Па;  $\Delta h$  — падіння тиску на робочій ділянці, Па;  $R = 287$  Дж/(кг·К) — газова постійна повітря;  $\xi = 0,96$  — коефіцієнт, одержаний за наслідками градування витратомірного пристрою.

3. Враховуючи, що при нагріві робочої ділянки в умовах

$$q_{\bar{n}0} = \frac{c_p M}{\pi d} \frac{dt_w}{dx} = const$$

температура рідини по довжині трубки  $x$  змінюється по лінійному закону, визначити середню температуру рідини по формулі

4. Підрахувати середню густину рідини

$$\rho_w = 0,5(t_{11} + t_{12}).$$

де  $p \approx B$  — середній абсолютний тиск рідини по довжині робочої ділянки, Па.

5. Обчислити значення температурного натиску в перетинах трубки з координатами  $x_i$  ( $i=1,2,\dots,10$ ).

$$\Delta t_i = (t_{\bar{n}0i} - t_{12}) - \frac{(t_{11} - t_{12})}{730} x_i,$$

де  $x_i$  — координати гарячих спаїв термопар, м;  $t_{12} \approx t_{oc}, ^\circ C$  — температура навколишнього середовища,  $^\circ C$ .

6. Визначити локальні значення коефіцієнтів тепловіддачі за формулою

$$\alpha_i = (Q - Q_n) / (\Delta t_i \pi d L), \quad (10.21)$$

де  $Q_n$  — втрати теплоти із зовнішньої поверхні робочої ділянки в навколишнє середовище за рахунок вільної конвекції, випромінювання і кінцевих втрат; підраховується за формулою

$$Q_n = k(\bar{t}_{\bar{n}0} - t_{12}),$$

де  $\bar{t}_{\bar{n}0} = \left( \sum_{i=1}^{10} t_{\bar{n}0i} \right) / 10$  — середня температура стінки,  $^\circ C$ ;  $k = 0,18$  — коефіцієнт, визначений дослідним шляхом.

7. Підрахувати середнє значення коефіцієнта тепловіддачі за формулою

$$\bar{\alpha} = \sum_{i=2}^9 \alpha_i L_i / \sum_{i=2}^9 L_i.$$

При визначенні середнього значення коефіцієнта тепловіддачі значення  $\alpha_1$  і  $\alpha_{10}$  унаслідок впливу витоків теплоти з торців робочої ділянки виключаються з розгляду.

8. За набутими локальними значеннями коефіцієнта тепловіддачі визначити основну ділянку труби (ділянка стабілізованої течії), де коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_i$  перестає залежати від умов на вході в трубу.

9. Підрахувати значення коефіцієнтів тепловіддачі  $\alpha$  на основній ділянці труби за залежністю (10.19), в якій число Рейнольдса визначається за масовою витратою  $M$  і середньої густини рідини  $\rho_w$ :

$$Re_w = \bar{w}d / \nu_w = 4\dot{M} / (\pi \rho_w \nu_w d),$$

і порівняти одержані результати з експериментальними значеннями  $\alpha$ .

10. Побудувати графік залежності (10.19) в логарифмічних координатах

$\lg Nu_e, \lg Re_e$ , на який нанести отримані експериментальні значення, відповідні основній ділянці труби для досліджених режимів.

Оцінка погрішностей вимірювань. Відносна середньоквадратична похибка непрямого вимірювання коефіцієнта тепловіддачі відповідно до (1.21), (10.20) і (10.21) буде рівна

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} 100 = \pm \left[ \left( \frac{2\Delta U}{U} \right)^2 + \left( \frac{\Delta R_e}{R_e} \right)^2 + \left( \frac{\Delta t_{\text{нб}}}{t_{\text{нб}} - t_e} \right)^2 + \left( \frac{\Delta t_e}{t_e - t_{\text{нб}}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta d}{d} \right)^2 + \left( \frac{\Delta L}{L} \right)^2 \right]^{1/2}.$$

Граничні відносні погрішності вимірювання фізичних величин, що входять в рівняння (10.22), визначаються по класу точності вимірювальних приладів.

Відносна погрішність при вимірюванні еталонним мостом МО-62 (класу 0,1) опору теплообмінної трубки визначається за формулою

$$\frac{\Delta R_e}{R_e} = \pm \frac{1}{100} (0,05 + 0,02N / R_e)$$

де  $R_e = 0,0344$  — вимірний опір, Ом;  $N=3$  — число декад магістра опорів.

При обчисленні погрішності вимірювання температури необхідно також враховувати погрішність градування термопар.

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Від яких чинників залежить інтенсивність перенесення теплоти від поверхні твердого тіла до оточуючого його газу?

2. У чому полягає закон тепловіддачі Ньютона?

3. Яке фізичне значення коефіцієнта тепловіддачі?

4. Чим пояснюється зменшення коефіцієнта тепловіддачі на початковій ділянці труби?

5. Як визначається середній температурний натиск по довжині труби?

6. Як за експериментальними даними обчислюється локальний (місцевий) і середній коефіцієнти тепловіддачі?

7. При яких значеннях критерію Рейнольдса режим руху газу в трубі є ламінарним, перехідним і турбулентним?

8. Як визначається швидкість руху повітря в трубі?

9. Назвіть критерії подібності для явища тепловіддачі. Які безрозмірні комплекси називаються визначальними критеріями подібності?

10. У чому полягає перевага безрозмірних критерійних залежностей в порівнянні із звичними залежностями, що містять розмірні змінні?