

Міністерство освіти і науки України

Київський національний університет будівництва і архітектури

Кафедра теплогазопостачання та вентиляції

Розрахункова робота

«Розрахунок похибки виміру коефіцієнта конвективної тепловіддачі
по результатах виміру на лабораторному стенді»

Виконав:
студент групи

Перевірив:

Київ – 202_ р.

1. Вихідні дані

Термоперетворювач	BP(A)-1
Клас точності амперметра	0,05
Клас точності потенціометра	0,05
Номинальне значення термо-ЕРС потенціометра при вимірі температури стінки труби	2,871 мВ
Температура оточуючого середовища (повітря)	22,0 °С
Сила струму в ланцюгу нагрівача при здійсненні вимірювань	2,5 А
Електричний опір трубки	0,55 Ом

1.1 Приклад розрахунку похибки виміру коефіцієнта конвективної тепловіддачі на лабораторному стенді.

Були проведені дослідження тепловіддачі від нагрітої металевої трубки до оточуючого повітря. Досліджувалось значення коефіцієнта тепловіддачі за рахунок конвекції від відповідних значущих факторів. Теоретичною базою дослідження є залежність, яка пов'язує фізичні величини, що враховують умови та закономірності процесу тепловіддачі

$$\alpha_k = \frac{Q_k}{F \cdot (t_c - t_{oc})}, \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°С})$$

де α_k – коефіцієнт тепловіддачі за рахунок конвекції, Вт/(м²°С)

Q_k – конвективний тепловий потік від нагрівального елемента, Вт

F – площа поверхні нагріву трубки, м²

t_c та t_{oc} – температура, °С, відповідно, поверхні трубки та оточуючого середовища (повітря).

Результат та похибка виміру коефіцієнта тепловіддачі α_k знаходяться в залежності від значень та похибок виміру величин Q_k , F , t_c та t_{oc} , тобто похибка визначення кожної з них є складовою похибки виміру коефіцієнта тепловіддачі. Слід зазначити, що коефіцієнт тепловіддачі визначається як результат непрямих вимірів. У зв'язку з тим, що всі параметри, що вимірюються, визначаються з допустимими (нормованими) відхиленнями, які можна вважати граничними значеннями похибки

(межею допустимої похибки), то і сам коефіцієнт тепловіддачі може бути оцінений з певною межею допустимої похибки.

$$\Delta\alpha_k = \sqrt{\left(\frac{\partial\alpha_k}{\partial Q_k}\Delta Q_k\right)^2 + \left(\frac{\partial\alpha_k}{\partial F}\Delta F\right)^2 + \left(\frac{\partial\alpha_k}{\partial t_c}\Delta t_c\right)^2 + \left(\frac{\partial\alpha_k}{\partial t_{oc}}\Delta t_{oc}\right)^2}$$

Визначення похибки $\Delta\alpha_k$ для коефіцієнта тепловіддачі α_k розпочинають з визначення межі похибки для кожної з фізичних величин Q_k , F , t_c та t_{oc} , тобто ΔQ_k , ΔF , Δt_c та Δt_{oc} ;

2.1 Температура стінки трубки

Температура стінки трубки вимірювалась стандартним термоелектричним термометром типу ТХА (термоперетворювач ВР(А) в комплекті з потенціометром ПП-63. Показання потенціометра (номінальне значення) склали $U=2,871$ мВ. За таблицею 1 (дод.1) такому значенню термо – ЕРС відповідає значення температури $t_c=200^\circ\text{C}$.

3.1 Площа поверхні нагріву трубки

Площа поверхні нагріву трубки F визначається як

$$F = \pi \cdot d \cdot l, \text{ м}^2$$

де d – діаметр трубки, визначений за допомогою штангенциркуля і дорівнює $10 \text{ мм}=0,01 \text{ м}$;

l – довжина трубки, що визначена лінійкою, і дорівнює $100 \text{ мм}=0,1 \text{ м}$.

Поверхня нагріву дорівнює

$$F = 3,14 \cdot 0,01 \cdot 0,1 = 0,00314 \text{ м}^2.$$

4.1 Температура оточуючого повітря

Температура оточуючого повітря визначалась скляним лабораторним хімічним термометром розширення ТЛ-4-2 зі шкалою $0\dots 55^\circ\text{C}$, ціна поділу – $0,1^\circ\text{C}$ і складала $t_{oc}=22^\circ\text{C}$.

5.1 Тепловий потік

Загальний тепловий потік (за рахунок конвекції та випромінювання) від нагрівального елемента Q , Вт, визначається потужністю електронагрівача

$$Q = I^2 \cdot R_t$$

Номинальне значення сили струму у ланцюгу відповідно до показань амперметра (завдання) склало $I=2,5$ А.

Електричний опір трубки R_t , Ом визначається в залежності від значення її температури t_c за формулою

$$R_t = R_0 \cdot (1 + a \cdot t_c), \text{ Ом}$$

де $a = 4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ – температурний коефіцієнт опору (стала величина для певного матеріалу);

$R_0 = 0,6$ Ом - значення опору трубки при температурі стінки $t_c=0^\circ\text{C}$

$$R_t = 0,6 \cdot (1 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot 200) = 1,08 \text{ Ом}$$

Значення загального теплового потоку у відповідності до формули (3.2) складе

$$Q = 2,5^2 \cdot 1,08 = 6,75 \text{ Вт}$$

$$Q_B = C_{\text{пр}} \left(\left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{ос}}}{100} \right)^4 \right) F, \text{ Вт}$$

T_c та $T_{\text{ос}}$ - абсолютна температура стінки трубки та оточуючого середовища відповідно. ($T_i = t_i + 273$);

$C_{\text{пр}}$ - приведений коефіцієнт випромінювання, $\text{Вт}/\text{м}^2\text{K}^4$;

$$C_{\text{пр}} = C_0 \cdot \varepsilon,$$

C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{K}$,

$$C_0 = 5,67 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{K};$$

ε – ступінь чорноти для нержавіючої сталі, $\varepsilon = 0,56$.

$$C_{\text{пр}} = 5,67 \cdot 0,56 = 3,175 \text{ Вт}/\text{м}^2\text{K}^4.$$

$$Q_B = 3,175 \left(\left(\frac{200 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{22 + 273}{100} \right)^4 \right) 0,00314 = 3,175 \left(\left(\frac{473}{100} \right)^4 - \left(\frac{295}{100} \right)^4 \right) 0,00314 = \\ = 4,23 \text{ Вт.}$$

Конвективний тепловий потік визначається за формулою:

$$Q_K = Q \cdot Q_B, \text{ Вт}$$

$$Q_K = 6,75 - 4,23 = 2,52 \text{ Вт}$$

Тоді коефіцієнт тепловіддачі за рахунок конвекції:

$$\alpha_K = \frac{2,52}{0,00314 \cdot (200 - 22)} = 4,51 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°C})$$

2.1 Абсолютна похибка виміру сили струму

Сила струму I вимірювалась амперметром із шкалою $0...50$ А класу $0,1$ - тобто допустима межа похибки не повинна перевищувати $\pm 0,1\%$ від діапазону вимірювання. Основна похибка виміру сили струму не повинна перевищувати

$$\Delta I = 0,1\% \left(\frac{50 \text{ A}}{100\%} \right) = \pm 0,05 \text{ A}$$

2.2 Абсолютна похибка виміру температури стінки трубки

Температура стінки трубки t_c вимірювалась стандартним термоелектричним термометром типу ТВР (термоперетворювач вольфрамовий). Похибка визначення температури стінки Δt_c підраховується з похибок виміру термо-ЕРС потенціометра Δe_n та термоелектричного термометра Δe_T . У відповідності до паспорту потенціометра границя допустимої похибки визначається з формули

$$\Delta e_n = \pm (5 \cdot 10^{-4} \cdot U + 0,5 \cdot U_p), \text{ мВ}$$

де: U – показання потенціометра, мВ;

U_p – ціна поділу шкали, мВ, яка дорівнює 0,05 мВ.

$$\Delta e_n = \pm (5 \cdot 10^{-4} \cdot 2,871 + 0,5 \cdot 0,05) = 0,0264, \text{ мВ}$$

Допустиме відхилення від номінального значення термо-ЕРС термометра ПП(S) в діапазоні значень температур $0...300$ °С і складає $\Delta e_m = 0,08$ мВ (Додаток 1, табл. 2) Обидві складові є незалежними одна від другої, а сумарна похибка Δe_Σ підраховується з формули:

$$\Delta e_\Sigma = \pm \sqrt{\Delta e_T^2 + \Delta e_n^2}, \text{ мВ}$$

$$\Delta e_\Sigma = \pm \sqrt{0,08^2 + 0,0264^2} = \pm \sqrt{0,0064 + 0,000064} = 0,084 \text{ мВ}$$

За додатком 1 в таблиці 1 шляхом інтерполяції визначаємо значення температури, що відповідає цьому значенню термо-ЕРС, яка і є похибкою в визначенні температури стінки t_c і дорівнює $\Delta t_c = \pm 2,1$ °С, або у відносних одиницях (відносно номінального значення температури стінки)

$$\frac{\Delta t_c}{t_c} = \frac{2,1}{200} = \pm 0,0105$$

2.3 Абсолютна похибка виміру температури оточуючого повітря

Межа допустимої основної похибки виміру температури оточуючого повітря t_{oc} у відповідності до паспорту скляного лабораторного термометру складає $\Delta t_{oc} = \pm 0,2^\circ\text{C}$, або у відносних одиницях

$$\frac{\Delta t_{oc}}{t_{oc}} = \frac{0,2}{22} = \pm 0,009$$

2.4 Абсолютна похибка виміру площі поверхні трубки

Абсолютна похибка виміру діаметра трубки штангенциркулем складає $\Delta d = \pm 0,01$ мм (0,00001 м), що відповідає ціні поділу, а довжини $\Delta l = \pm 0,5$ мм (0,0005 м).

Абсолютна похибка визначення площі поверхні трубки визначається за формулою і складе

$$\Delta F = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial d} \Delta d\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial l} \Delta l\right)^2}, \text{ м}^2$$

$$\Delta F = \pm \sqrt{\left(\frac{0,00314}{0,01} \cdot 0,00001\right)^2 + \left(\frac{0,00314}{0,1} \cdot 0,0005\right)^2} = \pm 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

2.5 Абсолютна похибка виміру теплового потоку

У відповідності до формули тепловий потік Q є результатом прямих вимірів сили струму I , A в ланцюгу та непрямих вимірів електричного опору R_t , Ом трубки. Тобто складовими абсолютної похибки теплового потоку ΔQ є абсолютні похибки сили струму ΔI та електричного опору трубки ΔR .

2.5.1 Визначення похибки виміру електричного опору

Похибка в визначенні опору трубки ΔR складається з похибки приладу для виміру опору ΔR_n та похибки виміру температури стінки трубки ΔR_t .

Складова ΔR_n визначається із умов задачі як $\pm 0,2\%$ (клас точності 0,2) від отриманого значення опору, який дорівнює $R_t = 1,08$ Ом і становить

$$\Delta R_n = \pm \frac{0,2\%}{100\%} \cdot 1,08, \text{ Ом}$$

$$\Delta R_n = \pm \frac{0,2\%}{100\%} \cdot 1,08 = \pm 0,00216 \text{ Ом}$$

Складова похибки виміру опору трубки за рахунок виміру температури складає

$$\Delta R_t = \pm R_0 \cdot \alpha \cdot \Delta t_c, \text{ Ом}$$

$$\Delta R_T = \pm 0,55 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 2,1 = 0,00462 \text{ Ом}$$

Межа сумарної допустимої похибки визначення опору трубки по значенню її температури при умові, що обидві похибки ΔR_T та ΔR_{Π} - є незалежними одна від другої, складе

$$\Delta R = \sqrt{\Delta R_{\Pi}^2 + \Delta R_T^2}, \text{ Ом}$$

$$\Delta R = \sqrt{0,00216^2 + 0,00462^2} = 0,00462 \text{ Ом}$$

Або у відносних одиницях

$$\frac{\Delta R}{R} = \pm \frac{0,0062}{1,08} = 0,0043$$

2.5.2 Абсолютна похибка визначення теплового потоку

Оцінюємо похибку визначення теплового потоку за формулою

$$\Delta Q_K = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial I} \Delta I\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial R} \Delta R\right)^2}, \text{ Вт}$$

$$\Delta Q_K = \pm \sqrt{\left(\frac{2,52}{2,5} 0,05\right)^2 + \left(\frac{2,52}{1,08} 0,00462\right)^2} = 0,0516 \text{ Вт}$$

Результати вимірів фізичних величин та їх абсолютних похибок

№ п/п	Фізична величина	Значення фізичної величини та абсолютної похибки	Значення відносної похибки, %
1	Конвективний тепловий потік, Q_K	$2,52 \pm 0,0516 \text{ Вт}$	$\pm 2,04$
	Складові: сила струму, I	$2,5 \pm 0,05 \text{ А}$	$\pm 2,0$
	Електричний опір трубки, R	$1,08 \pm 0,00462 \text{ Ом}$	$\pm 0,43$
2	Площа поверхні трубки, F	$0,00314 \pm 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$	$\pm 0,5$
3	Температура стінки трубки, t_c	$200 \pm 2,1^\circ \text{C}$	$\pm 1,05$
4	Температура оточуючого повітря, t_b	$22 \pm 0,2$	$\pm 0,91$

3 Визначення похибки виміру коефіцієнта тепловіддачі

Маючи значення допустимих похибок кожного аргументу, можна перейти до підрахунку границь похибки визначення коефіцієнта тепловіддачі. Спочатку визначаються часткові похідні кожної складової похибки:

$$\frac{\partial \alpha_{\kappa}}{\partial Q_{\kappa}} = \frac{1}{F(t_c - t_{oc})} = \frac{1}{0,00314(200-22)} = 1,79 \text{ (1/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

$$\frac{\partial \alpha_{\kappa}}{\partial F} = \frac{Q_{\kappa}}{F^2(t_c - t_{oc})} = \frac{2,52}{0,00314^2(200-22)} = 1435,9 \text{ (Вт/м}^4 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

$$\frac{\partial \alpha_{\kappa}}{\partial t_c} = \frac{Q_{\kappa}}{F(t_c - t_{oc})^2} = \frac{2,52}{0,00314(200-22)^2} = 0,025 \text{ (1/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}^2)$$

$$\frac{\partial \alpha_{\kappa}}{\partial t_{oc}} = \frac{Q_{\kappa}}{F(t_c - t_{oc})^2} = \frac{2,52}{0,00314(200-22)^2} = 0,025 \text{ (1/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}^2)$$

Абсолютна похибка складає

$$\Delta \alpha_{\kappa} = \sqrt{\left(\frac{\partial \alpha_{\kappa}}{\partial Q_{\kappa}} \Delta Q_{\kappa}\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha_{\kappa}}{\partial F} \Delta F\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha_{\kappa}}{\partial t_c} \Delta t_c\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha_{\kappa}}{\partial t_{oc}} \Delta t_{oc}\right)^2}, \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta \alpha_{\kappa} = \sqrt{(1,79 \cdot 0,0516)^2 + (1435,9 \cdot (1,6 \cdot 10^{-5}))^2 + (0,025 \cdot 2,1)^2 + (0,025 \cdot 0,2)^2} = \\ = 0,116 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Границя допустимої відносної похибки

$$\Delta = \frac{\Delta \alpha_{\kappa}}{\alpha_{\kappa}} \cdot 100\%$$

$$\Delta = \frac{0,116}{4,51} \cdot 100\% = 2,57\%$$

Остаточний результат $\alpha_{\kappa} = 4,51 \pm 0,116 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$