

УЗАГАЛЬНЕНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ТЕПЛОВІДДАЧІ ТА ОПОРУ ПОВІТРЯ ДЛЯ ПУЧКІВ ПЛОСКО-ОВАЛЬНИХ ТРУБ З ГРУПОВИМ ОРЕБРЕННЯМ ПЛАСТИНАМИ

Мошенцев Юрій Леонідович, канд. техн. наук, професор кафедри двигунів внутрішнього згоряння, установок та технічної експлуатації, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, e-mail: yuriiimosh@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1377-7498

Гогоренко Олексій Анатолійович, канд. техн. наук, в.о. завідувача кафедри двигунів внутрішнього згоряння, установок та технічної експлуатації, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, e-mail: oleksiy.gogorenko@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9157-6659

Немченко Андрій Володимирович, аспірант кафедри двигунів внутрішнього згоряння, установок та технічної експлуатації, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, e-mail: andrii.nemchenko@nuos.edu.ua, ORCID: 0009-0005-0650-3949

При моделюванні охолоджувачів наддувного повітря (ОНП) і радіаторів на стадії їх проєктування важливо визначити коефіцієнти тепловіддачі та опору повітря. Існують загальноприйняті формули для визначення конвективних коефіцієнтів тепловіддачі та опору, проте їх практичне застосування призводить до значних похибок, які виявляються під час експериментальних досліджень.

Мета цього дослідження полягає в уточненні залежностей для визначення конвективних коефіцієнтів тепловіддачі та опору для коридорних пучків плоско-овальних труб із поперечним груповим оребренням плоскими ребрами. Уточнення передбачає зміну числових коефіцієнтів у формулах на основі експериментальних даних, при цьому структура формул залишається незмінною.

Узагальнена залежність для визначення конвективних коефіцієнтів тепловіддачі, α_k , при коридорному розташуванні трубок згідно [1]

$$Nu_{kd_w} = 0,0512 \cdot \left(\frac{d_w}{S_4} \right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{S_2 - S_3}{S_4} \right)^{-0,14} \cdot Re^{0,73} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(1 + 1,9 \frac{h_r e}{S^2} \right) \quad (1)$$

для чисел $Re_{d_w} = 400 \dots 20000$

Узагальнена залежність для визначення опору за повітрям для тієї ж ПТ згідно [1]:

$$Eu \cdot Re^2 = 2,754 \cdot \left(\frac{d_w}{d_e} \right)^{0,3} \cdot \left(\frac{S_2 - d_w}{S_1 - d_w} \right)^{0,68} \cdot Re_{d_e}^{1,3} \cdot \left(1 + 1,9 \cdot \frac{h_r e}{S^2} \right) \cdot 1,65^{\lg Re_{d_e} - 2,53} \quad (2)$$

для чисел $Re_{d_e} = 400 \dots 2000$,

$$Eu \cdot Re^2 = 0,062108 \cdot \left(\frac{d_w}{d_e}\right)^{0,3} \cdot \left(\frac{S_2 - d_w}{S_1 - d_w}\right)^{0,68} \cdot Re_{de}^{1,85} \cdot \left(1 + 1,9 \cdot \frac{h_T e}{S^2}\right) \quad (3)$$

для чисел $Re_{de} = 2000 \dots 20000$.

Формули (1) – (3) відповідають таким особливостям ПТ: коридорне розташування трубок, групові поперечні плоскі ребра з поперечними гофрами (виштамповками); $d_w/S_4 = 0,55 \dots 1,20$; $(S_2 - S_3) \cdot S_4 = 1,30 \dots 1,85$; $Z_2 \geq 4$; визначальний розмір для (1) – d_w , для (2) і (3) – еквівалентний діаметр, d_e ; визначальна температура – середня логарифмічна, T_f ; похибка узагальнення становить 15 %.

Інформація про залежності, подібні до (1) – (3), не оприлюднюється в сучасних друкованих джерелах, ймовірно через те, що комерційні компанії, подібні до [2–4], які володіють такою інформацією, вважають її своєю конфіденційною та цінною власністю.

Дослідження для отримання залежностей виконувалося методом теплообмінника. При цьому підході вимірювання параметрів здійснюється лише на потоках теплоносіїв перед і після теплообмінного апарату. Цей метод дозволяє встановити всі невідомі параметри, пов'язані з теплопередачею [5]. Зокрема, можна визначити параметри тепловіддачі по воді та термічний опір стінки.

Для цього потрібно підготувати випробування на ряді спеціальних режимів, що відрізняються розходами теплоносіїв. Проте набагато простіше та дешевше провести дослідження на меншій кількості режимів, а деякі параметри визначати шляхом розрахунків. Це стосується параметрів, таких як тепловіддача від води та термічний опір стінки трубки. З правильно організованими режимами, ці параметри майже не впливають на тепловіддачу та опір поверхонь теплообміну (ПТ), які досліджуються. Більш того, їх можна достатньо точно обчислити за допомогою загальновідомих формул. Таким чином, експериментальне встановлення всіх невідомих параметрів можливе, але недоцільне з урахуванням багатьох моментів. З урахуванням сказаного, дане дослідження зосереджене лише на отриманні залежностей із теплообміну та опору даної ПТ у повітряному потоці.

Для внесення корекції у залежності був задіяний дослідний стенд в лабораторії кафедри ДВЗ, У та ТЕ в НУК. Для проведення експериментів на цьому стенді, було виготовлено три різних зразки теплообмінників із різними геометричними параметрами ПТ.

Дослідження теплообмінника I використовувалося для отримання даних щодо теплообміну та опору для поверхні вказаного типу. Теплообмінники II та III використовувалися для перевірки можливості узагальнення залежностей щодо теплообміну та опору для різних розмірів ПТ обраного типу на основі запропонованих у [1] виразів, створених з розмірів основних елементів ПТ. Експеримент проводився за різних режимів, а параметри цих режимів та отримані параметри під час випробування зразків I...III наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Режими випробування теплообмінників I, II, III та отримані параметри

Параметр	Од. виміру	Теплообмінник	Номер режиму				
			1	2	3	4	5
G_B	кг/с	I	0,105	0,199	0,299	0,392	0,505
		II	0,092	0,202	0,300	0,385	0,520
		III	0,088	0,180	0,310	0,402	0,510
G_w	кг/с	I, II, III	2,26				
t_{B1}	°C	I	104,0	115,0	120,6	117,5	118,9
		II	108,3	109,6	113,9	112,3	117,6
		III	108,7	110,4	117,9	114,4	120,1
t_{B2}	°C	I	33,8	43,2	50,7	55,4	61,0
		II	43,9	55,2	63,4	67,5	75,0
		III	39,4	49,6	61,5	65,1	72,5
t_{w1}	°C	I	31,5	32,6	34,1	35,3	37,0
		II	34,1	35,6	37,1	38,5	40,6
		III	31,5	32,6	34,1	35,3	37,0
t_{w2}	°C	I	32,3	34,1	36,3	37,9	40,1
T_{wf}	К	I	304,9	306,4	308,2	309,6	311,6
T_{Bf}	К	I	325,0	340,9	349,8	352,7	357,5
P_1	кПа	I	153,836	152,268	156,188	151,484	154,620
		II	153,231	152,310	154,170	152,388	155,500
		III	153,500	152,937	157,150	153,934	157,335
R_Σ	(м ² ·К)/Вт	I, II, III	$2,2 \cdot 10^{-06}$				
w_w	м/с	I, II, III	3,52				
Re_w	–	I	15587,59	16067,25	16681,63	17147,33	17817,27
Re_{dw}	–	I	1679,6	3066,1	4515,3	5881,4	7498,2
Nu_{kdw}	–	I	15,36	16,89	20,55	23,29	26,43
$lg Re_{dw}$	–	I	3,23	3,49	3,65	3,77	3,87
$lg Nu_{kdw}$	–	I	1,1	1,22752	1,312863	1,367099	1,422121
k	Вт/(м ² ·К)	I	156,96	177,61	215,82	242,29	273,15
α_{II}	Вт/(м ² ·К)	I	167,12	190,46	234,65	265,92	302,89
α_K	Вт/(м ² ·К)	I	174,23	199,65	248,51	283,62	325,74
η	–	I	0,968	0,871	0,808	0,755	0,707
		II	0,865	0,733	0,657	0,607	0,548
		III	0,881	0,768	0,667	0,614	0,568
Eu	–	I	–	4,673	4,170	4,144	4,165
$Eu \cdot Re^2$	–	I	–	43928552,6	85025759,3	14335548,5,6	23417338,8,3
$lg Eu$	–	I	–	0,670	0,620	0,617	0,620
$lg Re$	–	I	–	3,487	3,655	3,769	3,875
$lg(Eu \cdot Re^2)$	–	I	–	7,643	7,930	8,156	8,370
Δp	мм вод. ст.	I	–	205	420	760	1290
		II	107	468	1022	1702	3026
		III	110	402	1165	1996	3218

При встановленні залежності з теплообміну, за даними експерименту була побудована лінія тренду, представлена на рис. 1.

Отримана залежність з теплообміну справедлива для чисел $Re_{dw} \approx 400 \dots 9000$ і має вид

$$Nu_{kd_w} = 0,39 \cdot \left(\frac{d_w}{S_4}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{S_2 - S_3}{S_4}\right)^{-0,14} \cdot \left(1 + 1,9 \frac{h_T e}{S^2}\right) \cdot Re_{dw}^{0,495}.$$

Коефіцієнт 0,39 та степінь 0,495, відмінні від тих, що наведені в (1) і встановлені у цій роботі. Вирази у формулі, побудовані на основі розмірів ПТ, дають можливість використовувати залежність для ПТ такого ж типу, але зі зміною основних розмірів. З урахуванням цього, цю залежність можна вважати узагальненою. Все, що стосується узагальнення, було запозичено з [1]. Перевірка узагальнення виконувалася на основі експериментального дослідження пучків II та III.

При встановленні залежності з опору за повітрям, за даними експерименту була побудована лінія тренду, показана на рис. 2.

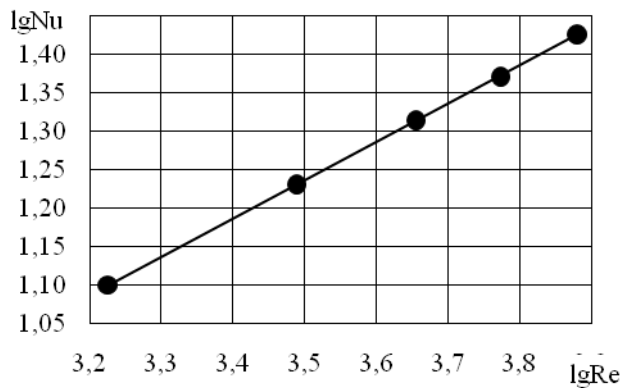


Рис. 1. Експериментальні точки та лінія тренду для визначення залежності по тепловіддачі

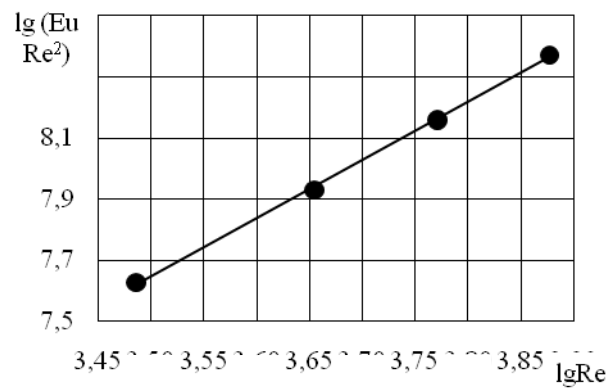


Рис. 2. Експериментальні точки та лінія тренду для визначення залежності з опору за повітрям

На основі графічної залежності встановлені значення коефіцієнтів Φ_{1dw} та m у формулі

$$Eu \cdot Re_{dw}^2 = \Phi_{1dw} \cdot Re_{dw}^m \cdot Z_2,$$

$$\Phi_{1dw} = 0,535 \cdot \left(\frac{dw}{d\varepsilon}\right)^{0,3} \cdot \left(\frac{S_2 - d_w}{S_1 - d_w}\right)^{0,68} \cdot \left(1 + 1,9 \frac{h_T e}{S^2}\right) \text{ при } Re_{dw} > 2000.$$

Якщо припустити, що для менших значень чисел Рейнольдса залежність буде відповідати тому, що зазначено у [1], тобто з іншим показником m , то важливо зазначити, що лінія, описана цією залежністю, обов'язково перетне попередню. В точці перетину обидві залежності даватимуть однаковий результат. Враховуючи це, для $Re_{dw} < 2000$

$$\Phi_{1dw} = 41,114 \cdot \left(\frac{d_w}{d_3}\right)^{0,3} \cdot \left(\frac{S_2 - d_w}{S_1 - d_w}\right)^{0,68} \cdot \left(1 + 1,9 \frac{h_{Te}}{S^2}\right) \cdot 1,65^{lg Re - 2,53}.$$

При цьому значення коефіцієнту $m = 1,3$.

Основна перевірка отриманих залежностей для пучків I, II та III проведена двома способами: порівнянням розрахункових та експериментальних параметрів на п'яти режимах; визначенням габаритних розмірів експериментального пучка на цих режимах за допомогою отриманих залежностей з теплообміну та опору.

За результатами перевірки встановлено, що відхилення для запропонованих залежностей по температурі повітря на виході з ОНП не перевищує $0,3\text{ }^\circ\text{C}$, а по опору становить майже 8% для режиму із найбільшою витратою повітря. Для звичайних швидкостей повітря відхилення менше 6% . За результатами всіх режимів випробування прямим розрахунком для цих режимів були підтверджені дійсні габаритні розміри експериментального пучка: $L \times B \times H = 184 \times 100 \times 110$ мм.

Розрахунки температури повітря на виході з ОНП і повітряний опір також були виконанні з використанням формул (1) – (3), після чого результати розрахунків були порівняні з експериментальними даними для відповідного режиму за звичайних швидкостей повітря. Виявлено, що відхилення по опору складає більше 13% , а відхилення по температурі – $4,6\text{ }^\circ\text{C}$. Використання елементів критеріальних залежностей (1)–(3) у програмі для прямого розрахунку теплообмінника призвело до отримання значень габаритів пучка, які не відповідають реальним параметрам. Зокрема, були отримані наступні габаритні розміри: $L \times B \times H = 345 \times 68 \times 50$ мм. Таким чином, встановлено, що похибки визначення коефіцієнтів тепловіддачі та коефіцієнтів опору повітря за формулами (1) – (3) є суттєвими і набагато перевищують похибки, отримані при розрахунку на основі залежностей, отриманих у даній роботі.

Висновки

Отримані залежності дозволяють проводити розрахунки теплообмінників, серцевини яких створені на основі коридорних пучків плоско-овальних труб з поперечним груповим оребренням плоскими ребрами. Підтвердження можливості використання цих залежностей отримано через експериментальні дослідження. Запропоновані залежності відрізняються від відомих аналогів тим, що надаються в єдиному комплексі, який варто використовувати у сучасних методиках розрахунку теплообмінних апаратів. Особливості отримання таких залежностей розкриті з урахуванням сучасних можливостей проведення досліджень.