

# Тепловіддача повітря за поперечного обтікання труб і трубних пучків

**Д.Є. Сінат-Радченко**, кандидат технічних наук, професор кафедри теплоенергетики та холодильної техніки Національного університету харчових технологій.

**Н.В. Іващенко**, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетики та холодильної техніки Національного університету харчових технологій.

**С.М. Василенко**, доктор технічних наук, професор кафедри теплоенергетики та холодильної техніки Національного університету харчових технологій.

Розглянуто тепловіддачу повітря за поперечного обтікання труб та трубних пучків в інтервалі температур – 50÷250°C. Для визначення коефіцієнтів тепловіддачі запропоновані досить прості але досить точні формули, які не потребують використання будь-яких таблиць, що спрощує розрахунки.

Ключові слова: повітря, труби, пучки труб, поперечне обтікання, режими течії, коефіцієнт тепловіддачі, поправки.

Heat transfer of air with transverse flow around pipes and tube bundles considered in the temperature range -50÷250°C. Simple and precise formulas are proposed for determining the heat transfer coefficients. Formulas do not require the use of tables, which simplifies the calculation.

Key words: air, pipes, tube bundles, transverse flow, flow regimes, heat transfer coefficient, corrections.

При обтіканні поодинокі труби потоком рідини на поверхні труби утворюється примежовий шар змінної товщини  $\delta$ . Мінімальна товщина шару і відповідно максимальні значення коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  (Вт/(м<sup>2</sup>·К)) у лобовій точці. Далі  $\delta$  поступово зростає, а в точці відриву примежовий шар відтісняється вихорями, які утворюються в кормовій частині течії.

Зміна  $\alpha$  по окружності циліндра в першу чергу визначається характером руху потоку рідини і величиною числа Рейнольдса  $Re = \omega d / \nu$ , де  $\omega$  – швидкість потоку рідини в найвужчому перерізі каналу, м/с;  $d$  – зовнішній діаметр труби, м;  $\nu$  – кінематична в'язкість рідини за її середньої температури, м<sup>2</sup>/с. Турбулізація граничного шару починається при  $Re > 5$ . При малих значеннях  $Re$  у лобовій частині труби  $\alpha$  більший, ніж у кормовій, а при великих – навпаки.

Критеріальне рівняння тепловіддачі при обтіканні труб і трубних пучків для краплинних рідин має вигляд [1, 2]:

$$Nu = C Re^n Pr^m \prod \varepsilon_i$$

Тут шуканий критерій Нуссельта (в нього входить  $\alpha$ )  $Nu = \alpha d / \lambda$ , де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності рідини, Вт/(м·К);  $Pr$  – число Прандтля, яке характеризує теплофізичні властивості рідини;  $\prod \varepsilon_i$  – добуток поправок на конкретні умови процесу теплообміну.

Для газів  $Pr$  в основному залежить від числа атомів в молекулі. Для повітря в розглядуваному інтервалі температур  $t = -50 \div 250^\circ\text{C}$   $Pr = 0,71$  [3, 4],  $Pr^m$  (для зовнішніх задач  $m = 0,33 \dots 0,38$ ) входить в константу рівняння  $C$  і вигляд критеріального рівняння тепловіддачі спрощується [3, 5] до

$$Nu = C Re^n \prod \varepsilon_i \quad (1)$$

У вказаному інтервалі температур

$$\nu = 6,856 \cdot 10^{-10} T^{1,765} \quad (\delta\nu = 0,95\%); \quad (2)$$

$$\lambda = (7,3 + 9170/T)^{-1} \quad (\delta\lambda = 0,80\%); \quad (3)$$

$$Re = 1,459 \cdot 10^9 T^{-1,765} \omega \cdot d. \quad (4)$$

Тут  $T$  – абсолютна температура повітря, К. В дужках наведено граничні відносні похибки формул для  $\nu$  і  $\lambda$ .

Розрахункова формула для середнього по периметру труби коефіцієнта тепловіддачі повітря

$$\alpha = C \operatorname{Re}^n \lambda d^{-1} \prod \varepsilon_i = C \nu^{-n} \lambda \omega^n d^{n-1} \prod \varepsilon_i.$$

Стосовно поодинокій труби при  $\operatorname{Re}=5 \div 10^3$  маємо  $C=0,49$ ,  $n=0,5$

$$\alpha = 18710 T^{-0,8825} (7,3 + 9170/T)^{-1} \omega^{0,5} d^{-0,5}. \quad (5)$$

Якщо  $\operatorname{Re}=10^3 \div 2 \cdot 10^5$ , то  $C=0,245$ ,  $n=0,6$  і

$$\alpha = 7,72 \cdot 10^4 T^{-1,059} (7,3 + 9170/T)^{-1} \omega^{0,6} d^{-0,4}. \quad (6)$$

При  $\operatorname{Re}=3 \cdot 10^5 \div 2 \cdot 10^6$ ,  $C=0,020$ ,  $n=0,8$

$$\alpha = 4,29 \cdot 10^5 T^{-1,412} (7,3 + 9170/T)^{-1} \omega^{0,8} d^{-0,2}. \quad (7)$$

Із зменшенням кута атаки  $\varphi$ , тобто кута між напрямком потоку і віссю труби,  $\alpha$  поступово зменшується. Як для поодинокій труби, так і для пучків труб поправку на величину кута атаки (для  $\varphi=30 \dots 90^\circ$ ) з граничною відносною похибкою в 2,3% можна оцінити за єдиною формулою

$$\varepsilon_\varphi = (\sin \varphi)^{0,567}. \quad (8)$$

Наприклад, при  $\varphi=30^\circ$  одержимо  $\varepsilon_\varphi=0,675$ , а при  $\varphi=50^\circ$  –  $\varepsilon_\varphi=0,860$ .

В пучках розміщення труб може бути коридорним і шаховим. Характеристиками пучка є діаметр труб  $d$  та відносні відстані між осями труб по ширині пучка  $s_1/d$  і по його глибині  $s_2/d$ . Поправка  $\varepsilon_s$  на вплив відносних кроків труб: для коридорного розміщення труб

$$\varepsilon_{sK} = (s_2/d)^{-0,15}; \quad (9)$$

для шахового розміщення

$$\text{при } s_1/s_2 < 2 \quad \varepsilon_{sIII} = (s_1/s_2)^{1/6},$$

$$\text{при } s_1/s_2 \geq 2 \quad \varepsilon_{sIII} = 1,12. \quad (10)$$

Тепловіддача суттєво залежить від початкової турбулентності потоку. Починаючи з третього ряду турбулентність потоку стабілізується. Критеріальні рівняння для  $\alpha$  одержано на основі узагальнення експериментальних даних стосовно 3-го і наступних рядів пучка. У першому ряду труб тепловіддача дещо менша  $\alpha_1 = 0,6\alpha_3$ , у другому для шахового пучка  $\alpha_{2ш} = 0,7\alpha_3$ , а для коридорного  $\alpha_{2K} = 0,9\alpha_3$ .

При визначенні середнього для всього пучка  $\alpha$  вводиться поправка  $\varepsilon_N$ , яка враховує кількість рядів труб « $n$ » у пучку. Для коридорного пучка

$$\varepsilon_{N,K} = (n - 0,5) / n; \quad (11)$$

для шахового

$$\varepsilon_{N,ш} = (n - 0,7) / n. \quad (12)$$

Стосовно коридорного і шахового пучків при  $\operatorname{Re}=10^2 \div 10^3$  маємо  $C=0,49$ ,  $n=0,5$ , а коефіцієнт тепловіддачі для 3-го і наступних рядів

$$\alpha_K = \alpha_{ш} = 1,871 \cdot 10^4 T^{-0,8825} (7,3 + 9170/T)^{-1} \omega^{0,5} d^{-0,5}. \quad (13)$$

Якщо  $\operatorname{Re} > 2 \cdot 10^5$ , то  $C=0,0186$ ,  $n=0,84$  і

$$\alpha_K = \alpha_{ш} = 9,273 \cdot 10^5 T^{-1,483} (7,3 + 9170/T)^{-1} \omega^{0,84} d^{-0,16}. \quad (14)$$

Коли у коридорному пучку  $\operatorname{Re}=10^3 \div 2 \cdot 10^5$ , то  $C=0,20$ ,  $n=0,65$  і

$$\alpha_K = 1,81 \cdot 10^5 T^{-1,147} (7,3 + 9170/T)^{-1} \omega^{0,65} d^{-0,35}. \quad (15)$$

В цьому ж інтервалі чисел Рейнольдса у шаховому пучку  $C=0,35$ ,  $n=0,6$ , а

$$\alpha_{ш} = 1,10 \cdot 10^5 T^{-1,059} (7,3 + 9170/T)^{-1} \omega^{0,6} d^{-0,4}. \quad (16)$$

Розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі повітря розглянемо на прикладі за таких вихідних даних:  $t=100^\circ\text{C}$ ;  $\omega=10$  м/с;  $d=0,05$  м;  $\varphi=50^\circ$ . Треба знайти  $\alpha$  для поодинокій труби та для 8-рядних коридорного і шахового пучків при  $s_1=2,5d$  і  $s_2=2d$ .

При  $100^\circ\text{C}$  ( $373,15$  К) за формулою (2)  $\nu=23,74 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, за формулою (3)  $\lambda=3,137 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К), а за

формулою (4)  $Re=2,107 \cdot 10^4$ .

Використовуючи формули (6) і (8) стосовно поодинокій труби знайдемо  $\alpha=60,4 \cdot 0,860 = 52,0$  Вт/(м<sup>2</sup>К).

Вплив відносних кроків труб:

для коридорного пучка (формула 9)  $\varepsilon_{sK}=(s_2 / d)^{-0,15} = 2^{-0,15} = 0,901$ ;

а для шахового (формула 10)  $\varepsilon_{sII}=(s_1 / s_2)^{1/6} = (1,25)^{1/6} = 1,038$ .

Поправка на кількість рядів:

для коридорного пучка (формула 11)  $\varepsilon_{N,K}=(n-0,5) / n = (8-0,5) / 8 = 0,938$ ;

а для шахового (формула 12)  $\varepsilon_{N,II}=(n-0,7) / n = (8-0,7) / 8 = 0,912$ .

За формулою (15)  $\alpha_K=81,2$  Вт/(м<sup>2</sup>К) і середній коефіцієнт тепловіддачі для 8-рядного коридорного пучка

$$\alpha_K = \alpha_K \cdot \varepsilon_\varphi \cdot \varepsilon_{sK} \cdot \varepsilon_{NK} = 81,2 \cdot 0,860 \cdot 0,901 \cdot 0,938 = 59,0 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$$

За формулою (16)  $\alpha_{II}=86,0$  Вт/(м<sup>2</sup>К), а середній коефіцієнт тепловіддачі для шахового пучка  $\alpha_{II} = 86,0 \cdot 0,860 \cdot 1,04 \cdot 0,912 = 70,1$  Вт/(м<sup>2</sup>К).

За однакових умов тепловіддача в шахових пучках інтенсивніша в порівнянні з коридорними. У шахових пучках характер обтікання труб по глибині близький до характеру обтікання труб першого ряду.

Результати розрахунків  $\alpha$  за запропонованими формулами і розрахунків  $\alpha$  в опублікованих прикладах (через відповідні критеріальні рівняння) збігаються.

### Висновки

Проаналізовано основні варіанти тепловіддачі при поперечному обтіканні повітрям труб і трубних пучків. Найчастіше має місце змішаний режим течії повітря. Запропоновано просту формулу для оцінки впливу кута атаки, яка придатна як для поодиноких труб так і для пучків.

Наведено прості і досить точні формули для коефіцієнтів тепловіддачі без використання таблиць теплофізичних параметрів повітря, що полегшує і прискорює розрахунки. ■

### Список використаних джерел

1. Константинов С.М. Теоретичні основи теплотехніки: Підручник / С.М. Константинов, Є.М. Панов. – К.: «Золоті ворота», 2012. – 592 с.
2. Исаченко В.П. Теплопередача:учеб.для вузов / В.П. Исаченко, ВА. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 416 с.
3. Беляев Н.М. Основы теплопередачи: учебник /Н.М. Беляев. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 343 с.
4. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник. – Под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с.
5. Константинов С.М. Збірник задач з технічної термодинаміки та теплообміну: Навч. посіб / С.М. Константинов, Р.В. Луцик. – К.: Видавництво «Освіта України», 2009. – 544 с.

### Цікаві факти

## Вчені знайшли спосіб створювати їжу з електрики

Вчені з Фінляндії розробили пристрій, здатний за допомогою електрики перетворювати воду і вуглекислоту в білкову їжу. Пристрій змішує воду, вуглекислий газ і білкові гранули в біореакторі, після чого на отриману субстанцію подається електричний струм. В результаті виходить порошок, який містить близько 50% білка і 25% вуглеводів, решта - це жири і нуклеїнова кислота.

Суміш, з якої виробляється кінцевий продукт, утворюється завдяки бактеріям, які поглинають вуглекислий газ і перетворюють його в компоненти своїх власних клітин. Після подачі електричного струму бактерії гинуть, а їх останки розкладаються на молекули білків і цукрів. Одержаний розчин висушується в пристрої. В результаті залишається набір гранул, багатих на білки і вуглеводи.

Джерело: IA Regnum