

Тепловіддача за вимушеного руху повітря в трубах, каналах і вздовж плоскої стінки

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 при вимушеному русі повітря в трубах, каналах і вздовж плоскої стінки для інтервалу температур $-50...250^{\circ}\text{C}$ за різних режимів течії. Для визначення коефіцієнта тепловіддачі запропоновано прості й досить точні формули, які не потребують використання будь-яких таблиць, що спрощує розрахунок.

Ключові слова: повітря, вимушений рух, труби та канали, плоскі стінки, режими течії, коефіцієнт тепловіддачі.

The heat transfer in a forced movement of air in the pipes, canals and along the flat wall for the temperature range $-50...250^{\circ}\text{C}$ at various flow regimes. To determine the heat exchange coefficient simple and reasonably accurate formula, which does not require the use of any tables, simplifying the calculation.

Keywords: air, forced movement, pipes and canals, flat wall, flow regimes, the heat exchange coefficient.

Вимушена течія повітря (пружної рідини) в трубах і каналах може бути ламінарною (шари рідини рухаються паралельно, не перемішуючись) і турбулентною (вихровою). Режим течії визначають за величиною числа Рейнольдса $Re = \omega d / \nu$, де ω - середня по перерізу труби швидкість повітря, м/с; d - внутрішній (еквівалентний) діаметр (визначальний геометричний розмір), м; ν - кінематична в'язкість повітря, $\text{м}^2/\text{с}$.

При $Re \leq 2300$ течія ламінарна, при $Re \geq 10^4$ - турбулентна, при $2300 \leq Re \leq 10^4$ - перехідний режим течії. Для визначення коефіцієнта тепловіддачі α ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$) в кожному з цих трьох режимів використовують свої критеріальні рівняння та добуток поправок на конкретні умови теплообміну. Стосовно кожного рівняння обов'язково вказується визначальна температура - по ній знаходяться теплофізичні параметри рідини [1,2]. Ми розглянемо розрахунок α для найчастіше використовуваного інтервалу температур від -50 до 250°C .

Ламінарна течія може відбуватися за в'язкісного (природна конвекція відсутня і тепло передається лише теплопровідністю) і в'язкісно-гравітаційного режиму (вимушена течія супрово-

джується природною конвекцією). В'язкісний режим ймовірний за малих d , великої ν і малої різниці між температурами стінки і рідини $\Delta t = t_c - t$. Тут критеріальне рівняння тепловіддачі:

$$Nu = 0,15 Re^{0,33} Pr^{0,43} \approx 0,13 Re^{0,33} \quad (1)$$

В шуканий критерій подібності Нуссельта $Nu = \alpha d / \lambda$ входять α , d та теплопровідність повітря λ , $\text{Вт}/(\text{мК})$. Число Прандтля $Pr = \nu / a$ характеризує теплофізичні властивості рідини (a - коефіцієнт температуропровідності, $\text{м}^2/\text{с}$). В розглядуваному інтервалі температур повітря $Pr = 0,71$ [2,3].

В'язкість ν і λ повітря зростають з підвищенням t . Від тиску (p , Па) ν практично не залежить, а незначним збільшенням λ при підвищенні p можна знехтувати (якщо $p < 1$ МПа) [4].

Кінематична в'язкість повітря з граничною відносною похибкою $\delta \nu = 0,95\%$:

$$\nu = 6,856 \cdot 10^{-10} T^{1,765}, \text{ м}^2/\text{с} \quad (2)$$

тут T , K - абсолютна температура повітря. Теплопровідність повітря з $\delta \lambda = 0,80\%$:

$$\lambda=(7,3+9170/T)^{-1}, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}) \quad (3)$$

Число Рейнольдса

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

$$\text{Re}^{0,33}=1057 T^{-0,5825} (\omega d)^{0,33}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі у в'язкісному ламінарному режимі

$$\alpha_b=137,4 T^{-0,5825} (7,3+9170/T)^{-1} \omega^{0,33} d^{-0,67} \quad (5)$$

Різниця густини рідини внаслідок неоднаковості її температури і вплив гравітаційного поля можуть викликати вільну конвекцію. Коли підйомні сили перевищують сили в'язкості, в'язкісний режим ламінарної течії переходить у в'язкісно – гравітаційний. Це відбувається, коли на вході в трубу $Gr \cdot Pr > 8 \cdot 10^5$ або $Gr > 5,68 \cdot 10^5$, або $(t_c - t_o) d^3 > 2,73 \cdot 10^{-14} T_m^{4,53}$.

Число Грасгофа характеризує інтенсивність вільної конвекції $Gr = g \cdot \beta \cdot (t_c - t_o) \cdot d^3 / \nu^2$, де $g = 9,807 \text{ м}^2/\text{с}^2$ – прискорення вільного падіння; $\beta = 1/T, \text{ К}^{-1}$ – ізобарний коефіцієнт термічного розширення повітря; t_o – температура повітря (рідини) на вході в трубу. Визначальною для формули границі між в'язкісною і в'язкісно-гравітаційною течіями є середня температура граничного шару $t_r = 0,5(t_c + t_o)$.

Для в'язкісно-гравітаційного ламінарного режиму критеріальне рівняння тепловіддачі

$$\text{Nu} = 0,13 \text{Re}^{0,33} \text{Gr}^{0,1} \quad (6)$$

Число Грасгофа

$$\text{Gr} = 2,086 \cdot 10^{19} T^{-4,53} (t_c - t) d^3, \quad (7)$$

$$\text{Gr}^{0,1} = 85,5 T^{-0,453} \Delta t^{0,1} d^{0,3}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha_{\text{вг}} = 11750 T^{-1,035} \Delta t^{0,1} (7,3+9170/T)^{-1} \omega^{0,33} d^{-0,37} \quad (8)$$

В критеріальних рівняннях тепловіддачі визначальною є середня температура рідини t (t_c – середня температура стінки, температурний напір $\Delta t = t_c - t$). Через природну конвекцію α може зрости в кілька разів.

За турбулентного режиму течії критеріальне рівняння тепловіддачі

$$\text{Nu} = 0,021 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,43} \text{Pe}_i = 0,018 \text{Re}^{0,8} \text{Pe}_i \quad (9)$$

де Pe_i – добуток поправок,

$$\text{Re}^{0,8} = 2,1436 \cdot 10^7 T^{-1,412} (\omega d)^{0,8}. \quad (10)$$

Коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha_T = 3,86 \cdot 10^5 (7,3+9170/T)^{-1} T^{-1,412} \omega^{0,8} d^{-0,2} \quad (11)$$

Поправка ε_l на довжину труби коротких труб ($l/d < 50$). Якщо $l/d \geq 50$, то $\varepsilon_l = 1$.

$$\varepsilon_l = a - b \cdot \lg(l/d),$$

де $a = (1,426 - 3,234 / \lg \text{Re})^{-1}$, $b = 0,5886 (a - 1)$. Наприклад, коли $\text{Re} = 10^4$ та $l/d = 2$, одержуємо $\varepsilon_l = 1,51$ (табличне значення 1,50) [5].

Для вигнутих труб водиться поправка на радіус вигину (береться по осі труби) $\varepsilon_R = 1 + 1,8d/R$ [2]. Якщо $d = 0,1 \text{ м}$, а $R = 1 \text{ м}$, то $\varepsilon_R = 1,18$.

При розрахунках тепловіддачі в трубах не круглого поперечного перерізу за визначальний лінійний розмір береться еквівалентний діаметр $d_e = 4f/P$, де f – поперечний переріз каналу, м^2 ; P – периметр поперечного перерізу, м . Коли повітря (рідина) тече в кільцевому каналі, d_e дорівнює різниці між зовнішнім та внутрішнім діаметрами кільцевого перерізу і вводиться поправка – відношення цих діаметрів в степені 0,18. У випадку прямокутного перерізу каналу зі сторонами a і b $d_e = 2ab/(a+b)$.

За ламінарної течії шорсткість поверхні труби не впливає на α і гідравлічний опір. За турбулентної течії α в шорстких трубах може як зростати так і зменшуватись в порівнянні з гладкими.

В перехідному (між ламінарним і турбулентним) режимі течії коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_n = \alpha_T \cdot \varepsilon_n$, де ε_n – поправковий коефіцієнт до α_T , розрахованого за формулою (11) для турбулентного режиму. Поправковий коефіцієнт $\varepsilon_n = a + b / \text{Re}$, $b = 1800 - 220 \lg \text{Gr}$ та $a = 1 + b \cdot 10^{-4}$.

Наприклад, при $\text{Gr} = 10^6$ і $\text{Re} = 3000$ отримаємо $b = 480$, $a = 1,048$ та $\varepsilon_n = 0,888$ [6].

Коефіцієнт чергованості (частка часу, коли має місце турбулентна течія) $\xi = 1,3 - 3000/\text{Re}$. Наприклад, при $\text{Re} = 3000$ $\xi = 0,3$.

За в'язкісно-гравітаційної ламінарної течії гідравлічний опір пропорційний ω і важливим фактором є орієнтація труби в просторі. При турбулентній течії гідравлічний опір пропорційний ω^2 , а орієнтація труби в просторі на α_T не впливає. За перехідного режиму ламінарна і турбулентна течії почергово змінюють одна одну.

Розглянемо тепловіддачу повітря в прямій трубі з $d = 0,1 \text{ м}$ при $T_o = 280 \text{ К}$ (на вході), $T = 300 \text{ К}$ (середня температура повітря, визначальна), $T_m = 340 \text{ К}$ (середня температура граничного шару на вході), $T_c = 400 \text{ К}$ (середня температура стінки), $\nu = 16,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (за формулою (2)),

$\lambda=0,0264$ Вт/(м·К) (за формулою (3)).

При $\omega=0,3$ м/с за формулою (4) $Re = 1,459 \cdot 10^9 \cdot 300^{-1,765} \cdot 1,3 \cdot 0,1 = 1858$ і течія ламінарна. З'ясуємо наявність конвекції: $(T_c - T_o)d^3 = 0,12$; $2,73 \cdot 10^{-14} T_m^{4,58} = 0,012 < 0,12$

Режим течії в'язкісно-гравітаційний. За формулою (8)

$$\alpha_{Br} = 11750 \cdot 300^{-1,035} 100^{0,1} (7,3 + 9170/300T)^{-1} \cdot 0,3^{0,33} 0,1^{-0,37} = 2,11 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

При збільшенні швидкості повітря до 20 м/с за формулою (4) $Re = 1,24 \cdot 10^5 > 10^4$ і течія турбулентна. За формулою (11)

$$\alpha_T = 3,86 \cdot 10^5 (7,3 + 9170/300)^{-1} 300^{-1,412} 20^{0,8} 0,1^{-0,2} = 56,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

За ламінарної течії повітря вздовж плоскої стінки ($Re < 4 \cdot 10^4$)

$$Nu = 0,57 Re^{0,5} \\ Re^{0,5} = 3,82 \cdot 10^4 T^{1,329} (\omega)^{0,5} \quad (12)$$

Коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha_{пл} = 21770 \cdot T^{-0,8825} (7,3 + 9170/T)^{-1} \omega^{0,5} d^{-0,5} \quad (13)$$

При турбулентній течії вздовж плоскої стінки

$$(Re > 4 \cdot 10^4) \\ Nu = 0,032 Re^{0,8} \quad (14)$$

де $Re^{0,8}$ знаходиться за формулою (10)).

Коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha_{пл} = 6,86 \cdot 10^5 (7,3 + 9170/T)^{-1} T^{-1,412} \omega^{0,8} l^{-0,2} \quad (15)$$

В рівняннях тепловіддачі при русі повітря вздовж плоскої стінки визначальною є температура набігаючого потоку, а визначальним лінійним розміром – довжина l стінки в напрямі потоку [2].

При довжині пластини $l = 1$ м, $T = 300$ К і $T_c = 400$ К та швидкості $\omega = 0,3$ м/с за формулою (4) $Re = 1,86 \cdot 10^4 < 4 \cdot 10^4$. Течія ламінарна і за формулою (13) $\alpha_{пл} = 2,05$ Вт/(м²·К). Якщо збільшити швидкість до 20 м/с, то $Re = 1,25 \cdot 10^6$, течія турбулентна і за формулою (15) $\alpha_{пл} = 63,3$ Вт/(м²·К).

За однакових вихідних даних

$$\alpha_{пл} = 0,032/0,018 = 1,78 \alpha_T,$$

тобто тепловіддача за турбулентної течії повітря вздовж плоскої стінки вища, ніж в трубах.

Має місце гарний збіг результатів, одержаних за запропонованими формулами з результатами опублікованих прикладів розрахунку через відповідні критеріальні рівняння тепловіддачі.

Висновки:

Проаналізовано основні можливі варіанти тепловіддачі за вимушеного руху повітря в трубах, каналах, вздовж плоскої стінки. Через малу в'язкість повітря режим його руху найчастіше є турбулентним.

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

Список використаних джерел

1. Василенко С.М. Основи тепломасообміну: підручник / С.М. Василенко, А.І. Українець, В.В. Олішевський. – К. : НУХТ, 2004. – 250 с.
2. Беляев Н.М. Основы теплопередачи: учебник / Н.М. Беляев. – К. : Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 343 с.
3. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общ.ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 560 с. (теплоэнергетика и теплотехника: Кн. 2).
4. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
5. Сінат-Радченко, Д.Є. Вплив довжини труби на тепловіддачу за різних режимів вимушеного руху рідини в трубах / Д.Є. Сінат-Радченко, С.М. Василенко, Н.В.Іващенко // Цукор України. – 2015, № 10. – С. 21-22.
6. Сінат-Радченко, Д.Є. Тепловіддача при перехідному режимі течії рідини у горизонтальних трубах / Д.Є. Сінат-Радченко, С.М. Василенко, О.М. Недбайло // Промышленная теплотехника. – 2014. Т. 36, №6. – С. 46-48.