

# Тепловіддача за вільного руху води у великому об'ємі

**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 за різних умов вільного руху води у необмеженому просторі. Запропоновано прості формули (не потребують використання будь-яких таблиць) і наведено числові приклади розрахунку коефіцієнта тепловіддачі в діапазоні температур 0...130 °С.

Ключові слова: вода, вільна конвекція, необмежений простір, число Релея, температурна функція властивостей, тепловіддача.

The heat transfer under different conditions of free movement of water in an unlimited space is considered. Simple formulas have been proposed (they do not require the use of any tables) and numerical examples are given for calculating the heat transfer coefficient in the temperature range of 0 ... 130°C.

Key words: water, free convection, unlimited space, Rayleigh number, temperature function of properties, heat transfer.

В промисловості і побуті воду використовують як робоче тіло, тепло- або холодоносій, як складову частину продукції.

Вода – асоційована рідина з нестійкими легко оборотними зв'язками молекул каркаса. Зв'язки розриваються і поновлюються внаслідок дифузії і плинності води. Молекули води весь час перебувають у коливальному русі. Біля твердих поверхонь утворюються структурні впорядковані шари молекул. Ряд фізичних властивостей води є аномальними.

В разі контакту з нагрітою поверхнею вода нагрівається, стає легшою і виникає природна висхідна течія (біля холодної поверхні течія рухається вниз). Якщо розглядувана течія не взаємодіє з іншими течіями – це вільна конвекція в необмеженому просторі (у великому об'ємі). Вода має малий коефіцієнт стисливості і впливом тиску на її властивості нехтують.

На рух води в основному впливають підйомна сила і сила в'язкості [1, 2]. Поля швидкості і температури тісно пов'язані між собою. Максимум швидкості знаходиться в межах граничного шару.

Режим конвекції визначається величиною критерію Релея:

$$Ra = g\beta(t_c - t)/(va), \quad (1)$$

де  $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$  – стандартне прискорення вільного падіння;  $\beta, \text{ К}^{-1}$  – температурний коефіцієнт об'ємного розширення;  $t_c$  і  $t, \text{ }^\circ\text{С}$  – середні температури стінки і води (за межами рухомого шару);  $\nu, \text{ м}^2/\text{с}$  – кінематична в'язкість води;  $a, \text{ м}^2/\text{с}$  – коефіцієнт теплопровідності [3, 4, 5].

Визначальний лінійний розмір поверхні теплообміну для горизонтальних труб – зовнішній діаметр  $d$ , для вертикальних труб і плит (пластин) – довжина вертикальної поверхні  $H$  від початку теплообміну, для горизонтальних плит – ширина.

Визначальною температурою є середня температура пристінного граничного шару  $t_m = (t + t_c)/2$ . Всі теплофізичні властивості води беруться за цієї температури.

Критеріальне рівняння для розрахунку тепловіддачі за вільної конвекції води має вигляд:

$$Nu = C Ra^n \quad (2)$$

Критерій Нуссельта  $Nu = \alpha l / \lambda$  є шуканим, бо в нього входить потрібний нам середній по поверхні теплообміну коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\lambda$ , Вт/(м·К) – коефіцієнт теплопровідності води. Сталі С та n визначаються на основі обробки експериментальних даних.

В інтервалі температур  $-15 \div 130$  °С густина води, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho = (0,001 + 1,3 \cdot 10^{-8} [t - 4]^{1,788})^{-1} \quad (3)$$

Гранична відносна похибка визначення густини  $\delta\rho = 0,05\%$  (983,59). Тут і після опису наступних формул для контролю правильності розрахунків наведено в дужках числове значення властивості при температурі 60 °С (близька до середньої в технологічних процесах).

Температурний коефіцієнт об'ємного розширення, К<sup>-1</sup> характеризує відносну зміну об'єму рідини при зміні її температури на 1°С (або на 1 К) за сталого тиску:

$$\beta = (\rho / \rho_c - 1) / (t_c - t) \quad (4)$$

Для звичайної води  $\beta = 0$  при 4 °С (для морської при 3 °С). При  $t < 4$  °С  $\beta$  від'ємний і при нагріванні талої води сонцем шари, що нагрілися опускаються вниз, а при  $t > 4$  °С нагріті шари залишаються зверху.

Кінематична в'язкість води, м<sup>2</sup>/с:

$$\nu \cdot 10^9 = \exp(0,2905 - 42,77/T)^{-1} \quad (5)$$

Тут  $T = t + 273,15$ , К – абсолютна температура води. При  $t = 8 \div 130$  °С  $\delta\nu = 0,7\%$  ( $477,4 \cdot 10^{-9}$ ). В'язкість переохолодженої води плавно продовжує залежність для плюсового інтервалу.

Теплопровідність, Вт/(м·К):

$$\lambda = [0,603 - 28,85 / (t + 100)]^{0,5} \quad (6)$$

За  $t = 0 \div 130$  °С  $\delta\lambda = 0,9\%$  (0,650).

Температуропровідність, м<sup>2</sup>/с:

$$a \cdot 10^8 = 20,283 - 700 / (t + 100) \quad (7)$$

При  $t = 0 \div 130$  °С  $\delta a = 0,4\%$  ( $15,91 \cdot 10^{-8}$ ).

В інтервалі температур  $0 \div 130$  °С число Релея можна визначити за формулою:

$$Ra = Fu \cdot g(t_c - t)^3, \quad (8)$$

де  $Fu = \beta / (\nu a)$  – відповідна температурна функція теплофізичних властивостей води.

Для  $t = 0 \div 130$  °С:

$$Fu = \exp(28,54 - 1619/t_p + 1,64 \cdot 10^5/t_p^2 - 8,338 \cdot 10^6/t_p^3) - 1 \cdot 10^9, \quad (9)$$

де  $t_p = (t_m + 100)$  – розрахункова температура. Наприклад, якщо  $t_m = 60$  °С, то  $t_p = 160$  °С, а  $Fu = 6,9378 \cdot 10^9$  с<sup>2</sup>/(м<sup>4</sup>·К). При 4°С  $Fu = 0$ .

Із збільшенням різниці температур між стіною і рідиною зростає підйомна (опускна) сила і інтенсивність вільного руху.

В критеріальному рівнянні (2) для вертикальних пластин і труб при  $Ra = 10^3 \div 10^9$   $C = 0,8$  і  $n = 0,25$  (ламінарий граничний шар), а при  $Ra > 10^9$   $C = 0,15$  і  $n = 0,33$  (турбулентний граничний шар).

Розрахунок тепловіддачі при  $Ra > 10^9$  виконується окремо для початкової ділянки  $H_{кр}$  з ламинарийм граничним шаром і для ділянки  $H - H_{кр}$  з турбулентною течією. Величина  $H_{кр} = 10^3 / (Fu \cdot g \Delta t)^{1/3}$ .

Наприклад, при 60 °С і  $\Delta t = 20$  °С одержимо  $H_{кр} = 0,0902$  м = 90,2 мм. Середнє по всій висоті  $H$  значення  $\alpha = \alpha_l H_{кр} / H + \alpha_t (1 - H_{кр} / H)$ , де  $\alpha_l$  та  $\alpha_t$  – середні значення  $\alpha$  на ламинарийній і турбулентній ділянках. При турбулентній течії  $\alpha$  не залежить від лінійного розміру поверхні теплообміну, а місцевий коефіцієнт тепловіддачі дорівнює середньому.

У випадку відхиленні поверхні теплообміну від вертикалі в формулу (2) вводиться поправковий коефіцієнт  $\varepsilon_\varphi = (1 + \cos\varphi) / 2$ , де  $\varphi$  – кут між нижньою поверхнею тепловіддачі і вертикаллю. Наприклад, при  $\varphi = 30^\circ$   $\varepsilon_\varphi = 0,937$ .

За тепловіддачі зовні горизонтальних труб при  $Ra = 10^3 \div 10^9$   $C = 0,5$  і  $n = 0,25$ . Для горизонтальних пластин, що охолоджуються зверху при  $Ra = 2 \cdot 10^4 \div 8 \cdot 10^6$   $C = 0,54$  і  $n = 0,25$ , а при  $Ra = 8 \cdot 10^6 \div 10^{14}$   $C = 0,15$  і  $n = 0,33$ . Якщо пластина охолоджується знизу  $C = 0,27$ , а  $n = 0,25$ .

За інших однакових умов  $\alpha$  при нагріванні більший, ніж при охолодженні. Розглянемо приклад. На технологічні потреби використовується гаряча вода з  $t = 60$  °С, яка нагрівається в баку за допомогою ряду горизонтальних труб зовнішнім діаметром  $d = 28$  мм при температурі стінки труб  $t_c = 100$  °С. Треба знайти густину теплового потоку до води  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>.

Тут  $t_m = (60 + 100) / 2 = 80$  °С,  $t_p = 80 + 100 = 180$  °С. За формулою (9)  $Fu = 10,6385 \cdot 10^9$  с<sup>2</sup>/(м<sup>4</sup>·К) і за формулою (8):

$$Ra = 10,6385 \cdot 10^9 \cdot 9,807 \cdot (100 - 60) \cdot 0,028^3 = 9,22 \cdot 10^7.$$

З формули (6)  $\lambda = 0,6654$  Вт/(м·К), а з рівняння

(2)  $\alpha = CRa^n \lambda / d = 0,5(9,22 \cdot 10^7)^{0,25} \cdot 0,6654 / 0,028 = 1164$  Вт/(м<sup>2</sup>К). Густина теплового потоку:

$$q = \alpha(t_c - t) = 1164(100 - 60) = 46500 \text{ Вт/м}^2.$$

Якщо режим течії відомий (відомі C і n) то коефіцієнт тепловіддачі можна відразу розрахувати за формулою:

$$\alpha = C\lambda(Fu \cdot g\Delta t)^n Pr^{n-1} \quad (10)$$

В деякій літературі за визначальну температуру беруть середню температуру рідини за межами граничного шару. В цьому випадку рівняння тепловіддачі має вигляд:

$$Nu = CRa^n \varepsilon_q, \quad (11)$$

$$\text{де } \varepsilon_q = (Pr/Pr_c)^{0,25}.$$

Поправка  $\varepsilon_q$  враховує напрям теплового потоку (нагрівання, охолодження) і величину температурного напору ( $t_c - t$ ). Число Прандтля  $Pr_r = \nu/a$  характеризує теплофізичні властивості рідини. З  $\delta Pr = 0,7\%$  для  $t = 0 \div 130^\circ\text{C}$

$Pr = 10^{-2} \exp(0,3434 - 55,92/T)^{-1}$ . При  $60^\circ\text{C}$   $Pr_r = 2,98$ , при  $100^\circ\text{C}$  –  $1,753$ . За формулами (2) і (11) значення  $\alpha$  близькі. Стосовно нашого прикладу це відповідно 1164 і 1194 Вт/(м<sup>2</sup>К).

#### Висновки

Запропоновані формули для розрахунку те-

пловіддачі за вільною конвекцією води у великому об'ємі прості і досить точні, дозволяють визначити коефіцієнти тепловіддачі для різних поверхонь теплообміну, різних умов і різних режимів конвекції без використання таблиць теплофізичних властивостей води, а відповідно і без інтерполяції між вузловими точками таблиць. Це спрощує і прискорює розрахунки. ■

#### Список використаних джерел

1. Константінов С. М. Теоретичні основи теплотехніки : Підручник/ С. М. Константінов, Є. М. Панов. К. : «Золоті ворота», 2012. 592 с.
2. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление : Справочное пособие / С. С. Кутателадзе. М. : Энергоатомиздат, 1990. 367 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. Александров А. А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара : Справочник Рек.ГСССД Р-776-98 /А. А. Александров, Б. А. Григорьев. М. : Изд-во МЭИ 1999. 168 с.
5. Свойства материалов и веществ : Вода и водяной пар. Вып.1. Таблицы стандартных справочных данных/ВНИЦ МВ. М. : Изд-во стандартов, 1990. 160 с.

#### Цікаві новини

### У Бразилії «зелений» поліетилен отримують з цукрової тростини

Технологія отримання «зеленого» поліетилену з цукрової тростини була розроблена бразильською компанією Braskem в 80-і роки в ході робіт з виробництва полівінілхлориду (ПВХ).

У 2007 році компанія Braskem запустила пілотний завод потужністю 12 тонн на рік для налагодження процесу. Саме компанії Braskem належить пальма першості в створенні і застосуванні цієї технології в промислових масштабах.

Тростину збирають на плантаціях і відправляють на переробку. Утворений сік піддають ферментації і дистиляції, в результаті чого отримують етанол. З дегідратованого етанолу отримують етилен, який потім полімеризують в поліетилен.

Перше покоління «зеленого» поліетилену компанія Braskem виробляла виключно з цукрової тростини. Але потенційними видами сировини можуть бути: кукурудза, цукрові буряки та інші сільськогосподарські культури, а в перспективі - відходи сільського господарства, деревообробки та побутове сміття.

Джерело: <http://vkartone.ru>