УДК 536.423.4

***О. Ф. Буляндра**, д-р. техн. наук*
***Д. Є. Сінат-Радченко**,*
канд. техн. наук
***Л. С. Гапонич**, канд. техн. наук*
Національний університет
харчових технологій

СПРОЩЕНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВІДДАЧІ ПРИ ПЛІВКОВІЙ КОНДЕНСАЦІЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ

Наведено методику розрахунку тепловіддачі при плівковій конденсації сухої насиченої нерухомої водяної пари при ламінарному і змішаному режимах руху плівки з урахуваннм поправок на хвильовий рух конденсату та змінність його фізичних властивостей з температурою. Для спрощення розрахунків пропонується використовувати узагальнені температурні залежності комплексів теплофізичних параметрів конденсату в діапазоні температур насичення від 20 до 300 °С: $A = exp\times\times(aln^2t_s+blnt_s+c)$, $B\cdot10^3 = (d/t_s^2+e/t_s+f)^{-1}$, де t_s — температура насичення. Знайдено коефіцієнти a, b, c, d, e, f у цих залежностях для інтервалів температур насичення, характерних для конденсаторів — 20...100 °С, опріснювальних та випарних установок — 100...300 °С, а також апаратів харчових технологій — 60...160 °С. Граничні відносні похибки не перевищують dA=2,5 %, $dB10^3$=1,8 %. Рекомендується використовувати отримані залежності при розрахунках опріснювальних і випарних апаратів, конденсаторів та різноманітних теплообмінних пристоїв.

***Ключові слова:** тепловіддача, плівкова конденсація, водяна пара, теплофізичні параметри, температура насичення.*

Конденсація пари часто зустрічається на практиці — у конденсаторах парових турбін пара конденсується на охолоджуваних трубах, конденсація пари здійснюється в опріснювальних та випарних установках і численних теплообмінних апаратах. Теплообмінні апарати, передача теплоти в яких супроводжується конденсацією пари на охолоджуваних поверхнях, є невід'ємною частиною теплових, ядерних, енергетичних, холодильних, хімічних установок, а також різного роду тепловідвідних пристроїв, що застосовуються в техніці.

Для розрахунків тепловіддачі при плівковій конденсації нерухомої водяної пари в конденсаторах на вертикальних трубах і поверхнях та на поверхнях горизонтальних труб використовуються рівняння [1, 2]:

для ламінарного руху плівки конденсату ($Re_d < 400$, $Z < 2300$) — число $Re_d = CZ^{0,75}$,

для змішаної течії плівки конденсату ($Re_d > 400$, $Z > 2300$) —

$$Re_\delta = \left[89 + 0,024\left(\frac{Pr_s}{Pr_c}\right)^{0,25} Pr_s^{0,5}(Z - 2300)\right]^{\frac{4}{3}},$$

де $Re_\delta = \dfrac{\bar{\alpha}\Delta tl}{r\rho\nu}$ або $Re_\delta = \bar{\alpha}\Delta tlB$, $\bar{\alpha}$ — середній по поверхні коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²ЧºС), Dt — різниця температур між температурою насичення пари t_s та стінки t_c, °С; Pr_s, Pr_c — числа Прандля для температури насичення пари t_s та стінки t_c, відповідно; l — визначальний лінійний розмір, для вертикальних поверхонь $l=h$, для горизонтальних труб $l=pR$, h — висота вертикальної труби або поверхні, м; R —

© О. Ф. Буляндра, Д. Є. Сінат-Радченко, Л. С. Гапонич, 2012

радіус труби, м; $Z = l\Delta t\left(\frac{g}{\nu^2}\right)^{\frac{1}{3}}\frac{\lambda}{r\rho\nu}$ або $Z=DtlA$, l, r, n — теплопровідність, Вт/(м·°С), густина, кг/м^3, кінематична в'язкість, м^2/с, конденсату; визначаються за t_s; r — питома теплота пароутворення, Дж/кг; g — прискорення вільного падіння, м/с^2; A, В — комплекси теплофізичних параметрів конденсату, що визначаються за t_s; B = = 1/(rrn), м/Вт; $A = \left(\frac{g}{\nu^2}\right)^{\frac{1}{3}}\frac{\lambda}{r\rho\nu}$, (м·°С)$^{-1}$.

Для вертикальних поверхонь C=0,943, для горизонтальних труб C=0,728. При розрахунках тепловіддачі при ламінарному русі плівки конденсату необхідно враховувати поправки на хвильовий рух конденсату e_v та змінність фізичних властивостей конденсату по товщині плівки з температурою e_T. Поправку на хвильовий рух можна розрахувати $e_v = Re_d^{0,04}$, поправку на змінність фізичних властивостей конденсату — $e_T=[(l_c/l_s)^3 \cdot m_s/m_c]^{-1}$, де l_s, l_c — теплопровідність конденсату при температурах насичення t_s та стінки t_c, відповідно; m_s, m_c — в'язкість конденсату при температурах насичення t_s та стінки t_c, відповідно.

Значення комплексів A і B для води в діапазоні температур від 20 до 300 °С наведено у таблиці [3]. Суттєво спростити розрахунки коефіцієнта тепловіддачі при конденсації водяної пари може використання температурних залежностей комплексів теплофізичних властивостей конденсату A і B. Для цього нами пропонуються прості в застосуванні залежності:

$A = \exp(a\ln^2 t_s + b\ln t_s + c)$,

$B \cdot 10^3 = (d/t_s^2 + e/t_s + f)^{-1}$.

При конденсації водяної пари під тиском пари нижче атмосферного (t_s = 20...100 °С) коефіцієнти в залежностях наступні: a = 0,30468, b = -0,88518, c = 1,5583, d = -649,51, e = 84,564, f = -0,136. Граничні відносні похибки dA=1,1 %, $dB \cdot 10^3$=1,2 %.

За тисків вище атмосферного (t_s = 100...300 °С) коефіцієнти наступні: a = 0,11315, b = 2,93166, c = -7,1655, d = -1146,91, e = 91,224, f = -0,1608. Граничні відносні похибки dA=2,5 %, $dB \cdot 10^3$=1,8 %.

У характерному для харчових технологій інтервалі температур насиченої водяної пари t_s = 60...160 °С: a = 0,09796, b = 0,8917, c = -2,252, d = -433,84, e = 81,2, g = -0,1272. Граничні відносні похибки dA=1,0 %, $dB \cdot 10^3$=0,7 %.

Висновки. Отримано розрахункові залежності комплексів теплофізичних властивостей конденсату від температури насичення. Використання отриманих температурних залежностей суттєво спрощує розрахунки тепловіддачі при плівковій конденсації нерухомої водяної пари в діапазоні температур насичення від 20 до 300 °С. Отримані залежності рекомендується використовувати при розрахунках опріснювальних і випарних апаратів, конденсаторів та різноманітних теплообмінних пристоїв, передача теплоти в яких супроводжується конденсацією пари на охолоджуваних поверхнях, — теплообмінників ядерних, енергетичних, холодильних, хімічних установок, а також різного роду тепловідвідних пристроїв, що застосовуються в техніці.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Исаченко В.П.* Теплопередача: Учебник для вузов, изд. 4-е, перераб. и доп. / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. — М.: Энергия, 1981. — 416 с.

2. *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. / С.С. Кутателадзе. — М.: Атомиздат, 1979. — 416 с.

3. *Краснощеков Е.А.* Задачник по теплопередаче./ Е.А. Краснощеков, А.С. Сукомел. — М.: Энергия, 1975. — 280 с.

О. Ф. Буляндра, Д. Е. Синат-Радченко,
Л. С. Гапонич

Упрощенный метод определения теплоотдачи при пленочной конденсации водяного пара

Представлена методика расчета теплоотдачи пленочной конденсации сухого насыщеного неподвижного водяного пара при ламинарном и смешаном режимах течения пленки с учетом поправок на волновое движение конденсата и изменение его физических свойств с температурой. Для упрощения расчетов предлагается использовать обобщенные температурные зависимости комплексов теплофизических параметров конденсата в диапазоне температур насыщения от 20 до 300 °С: $A = exp(aln^2t_s+blnt_s+c)$, $B\cdot10^3 = (d/t_s^2+e/t_s+f)^{-1}$, где t_s — температура насыщения. Найдены коефициенты a, b, c, d, e, f в этих зависимостях для интервалов температур насыщения, характерних для конденсаторов — 20...100 °С, опреснительных и испарительных установок — 100...300 °С, а также апаратов пищевых технологий — 60...160 °С. Предельные относительные погрешности не превышают dA=2,5 %, dВЧ10^3=1,8 %. Рекомендуется использовать полученные зависимости при расчетах опреснительных и испарительных апаратов, конденсаторов и разнообразных теплообменных апаратов.

Ключевые слова: *теплоотдача, пленочная конденсация, водяной пар, теплофызические параметры, температура насыщения.*

O. Bulyandra, D. Sinat-Radchenko,
L. Haponych

A simplified method of determining the intensity of heat transfer at the film condensation of water vapour

The article presents a method of calculating the intensity of heat transfer at the film condensation of dry saturated immobile vapour for the laminar and turbulent modes of film motion with regard for corrections for the wave motion of condensate and the variability of its physical properties with temperature. To simplify calculations, it is proposed to use the generalized temperature dependences of complexes of thermophysical parameters in the range of saturation temperatures from 20 to 300 °C: $A = exp\times(aln^2t_s+blnt_s+c)$, $B\cdot10^3 = (d/t_s^2+e/t_s+f)^{-1}$, where t_s is the saturation temperature. There are found the coefficients a, b, c, d, e, f in these dependences for the ranges of saturation temperature characteristic of condensers (20...100 °C), water-desalinating plants and evaporator systems (100...300 °C) as well as apparatus of food technologies (60...160 °C). The limiting relative errors do not exceed dA=2,5 %, dB10^3=1,8 %. It is recommended to use these dependences in calculations of water-desalinating plants, evaporator systems, condensers, and various heat exchangers.

Key words: *heat transfer, film condensation, water vapour, thermophysical parameters, saturation temperatures.*

e-mail: jimp@ukr.net

Надійшла до редколегії 30.04.2012 р.