

Горбунов А.Д. – д-р техн. наук, проф., ДГТУ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ В ТРУБАХ И КАНАЛАХ АНАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Аналитический расчёт коэффициента теплоотдачи затруднён в связи с отсутствием теоретических зависимостей теплофизических свойств от температуры. Получены простые приближённые зависимости для расчёта коэффициента теплоотдачи при развитом турбулентном течении четырёх широко распространённых теплоносителей: воды, водяного пара, воздуха и продуктов сгорания среднего состава. Проверка решений на адекватность дала положительный результат.

Постановка задачи

Аналитический расчет с использованием ПЭВМ коэффициента вынужденной теплоотдачи при турбулентном режиме по критериальному уравнению [1]:

$$Nu = D \cdot Re^m \cdot Pr^n \cdot \varepsilon_T \cdot \varepsilon_L \quad (1)$$

весьма затруднителен из-за зависимости теплофизических свойств веществ (λ , ν , Pr) от температуры, приведенных в справочниках, чаще всего в виде таблиц, требуемых интерполяции.

В уравнении (1) коэффициент ε_L учитывает изменения среднего коэффициента теплоотдачи по длине трубы, поправка ε_T – зависимость теплофизических свойств от температуры:

$$\varepsilon_T = (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25} \quad (2)$$

Чаще всего коэффициент $D = 0,021$, а показатели степени $m = 0,8$ и $n = 0,43$.

Изложение основных материалов исследования

Выразим из критериального уравнения коэффициент теплоотдачи в размерном виде:

$$\alpha = A_w(t) \cdot W^m \cdot d^{m-1} \cdot \varepsilon_T \cdot \varepsilon_L, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (3)$$

где W – скорость потока, м/с; d – внутренний диаметр трубы или гидравлический диаметр некруглого канала, м; $A_w(t) = D \cdot \lambda \cdot v^{-m} \cdot Pr^n$ – комплекс свойств, зависящий от температуры, Вт·с/(К·м^{2m-1}).

Если более достоверно известен массовый расход G (кг/с), а не скорость потока, то, используя формулу связи «скорость-расход», из (3) получим:

$$\alpha = A_G(t) \cdot G^m \cdot d^{-(m+1)} \cdot \varepsilon_T \cdot \varepsilon_L, \quad (4)$$

где $A_G(t) = (4/\pi \cdot \rho)^m \cdot A_w(t)$.

В случае, если теплоносители газообразные, то вместо массового расхода G используется объемный расход $V = G/\rho$, м³/с. Тогда формула (4) примет вид:

$$\alpha = A_v(t) \cdot V^m \cdot d^{-(m+1)} \cdot \varepsilon_T \cdot \varepsilon_L, \quad (5)$$

где $A_v(t) = (4/\pi)^m \cdot A_w(t) = 1,21319 \cdot A_w(t)$ при $m = 0,8$.

Для аналитического определения коэффициента теплоотдачи, используя табличные данные теплофизических свойств и методы множественной регрессии, можно получить аппроксимационную зависимость комплексов A_w или A_G , а также числа Прандтля от температуры. Аналогичный подход был применен в [2] для получения формул аналитического расчета коэффициента теплоотдачи при свободно конвективном охлаждении тел на воздухе. С целью упрощения расчетов можно ограничиться аппроксимацией величин параболой второго порядка:

$$y(x) = A + B \cdot x + C \cdot x^2. \quad (6)$$

Если известны значения искомой величины (функции) в трех точках: $y_1(x_1)$, $y_2(x_2)$, и $y_3(x_3)$, то коэффициенты аппроксимации следует определять по формулам:

$$C = \frac{b_{32} - b_{21}}{x_3 - x_1}; \quad B = b_{32} - C(x_2 + x_3); \quad A = y_1 - B \cdot x_1 - C \cdot x_1^2, \quad (7)$$

где $b_{32} = \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2}$; $b_{21} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$.

Наиболее употребляемыми теплоносителями в теплообменных аппаратах являются вода, водяной пар, воздух и продукты сгорания (дым). Используя данные [1] по коэффициенту теплопроводности, вязкости, числу Прандтля и параболической зависимости (6), были рассчитаны коэффициенты A , B и C для аналитического определения комплекса A_w , A_G , v и Pr . Результаты расчетов представлены в таблицах 1 и 2.

Аналогичную таблицу можно составить при других коэффициентах D , m , n уравнения (1) и для других жидкостей.

Для воды, при $m = 0,8$ и $n = 0,43$, в интервале температур $0 \dots 150$ °С было получено:

$$A_w(t) = 1411 + 21,7 \cdot t - 0,0524 \cdot t^2; \quad (8)$$

$$A_G(t) = 6,8173 + 0,104 \cdot t - 1,9 \cdot 10^{-4} \cdot t^2. \quad (9)$$

Аппроксимационные формулы для кинематической вязкости приведены в связи с необходимостью расчета числа Рейнольдса и определения режима течения жидкости.

Формулы, подобные уравнениям (8), (9), использовались и ранее. Например, в [3] для расчета A_w было получено соотношение:

$$A_w(t) = 1430 + 23,27 \cdot t - 0,0477 \cdot t^2, \quad (10)$$

если в исходном уравнении (1) положить $D = 0,023$, $m = 0,8$, $n = 0,4$, и $\varepsilon_T = 1$. Уравнения (8) и (10) хорошо согласуются друг с другом, однако неучёт поправки ε_T в методике [3] может приводить к погрешностям в определении коэффициента теплоотдачи примерно до 12 %.

Оценим погрешность полученных формул на следующем примере. Пусть по достаточно длинной трубке диаметром $d = 0,016$ м течет вода при средней температуре $t_{ж} = 14$ °С со скоростью $W = 2$ м/с. Температура поверхности стенки $t_{ст} = 28$ °С. Требуется определить коэффициент теплоотдачи от воды к трубке.

Точное решение по традиционному уравнению

По температуре $t = 14$ °С из таблиц свойств воды [1] с помощью интерполяции находим: коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,584$ Вт/(м·К), кинематическую вязкость $\nu = 1,18 \cdot 10^{-6}$ м²/с, числа Прандтля $Pr_{ж} (14) = 8,5$ и $Pr_{ст} (28) = 5,7$.

Определяем число Рейнольдса $Re = W \cdot d / \nu = 2 \cdot 0,016 / 1,18 \cdot 10^{-6} = 2,71 \cdot 10^4$. Так как число $Re > 10^4$, режим течения турбулентный, и можно пользоваться уравнением:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \varepsilon_T = 0,021 \cdot (2,71 \cdot 10^4)^{0,8} \cdot 8,5^{0,43} \cdot 1,105 = 205,06,$$

где поправка $\varepsilon_T = (Pr_{ж} / Pr_{ст})^{0,25} = (8,5 / 5,7)^{0,25} = 1,105$.

Окончательно коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = Nu \cdot \lambda / d = 205,6 \cdot 0,584 / 0,016 = 7484 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Таблица 1

Коэффициенты аппроксимации А, В и С для расчетов A_w , A_G

Вещество	Коэффициенты для определения A_w			Коэффициенты для определения A_G		
	А	$B \cdot 10^3$	$C \cdot 10^4$	А	$B \cdot 10^3$	$C \cdot 10^4$
Область применения, °С						
$\frac{\text{Вода}}{0 \dots 100}$	1411	21700	-524	6,8173	104,01	-1,9
$\frac{\text{Вод. пар}}{100 \dots 300}$	131,27	-2060	77,8	7,009	-32,45	1,6
$\frac{\text{Воздух}}{0 \dots 200}$	3,51804	-6,96	0,11	3,47497	2,56	-0,0095
$\frac{\text{Воздух}}{200 \dots 1200}$	3,05681	-2,6	0,0098	3,5683	2,03	-0,0061
$\frac{\text{Дым}}{0 \dots 200}$	3,5458	6,23	0,11	3,4981	3,23	0,013
$\frac{\text{Дым}}{200 \dots 1200}$	3,14068	2,17	0,0083	3,57229	3,23	-0,0059

Таблица 2

Коэффициенты аппроксимации А, В и С для расчетов ν и P_r

Вещество	Коэффициенты кинематической вязкости $\nu \cdot 10^6$, м ² /с			Коэффициенты для определения P_r		
	А	$B \cdot 10^3$	$C \cdot 10^4$	А	$B \cdot 10^3$	$C \cdot 10^4$
Область применения, °С						
$\frac{\text{Вода}}{0 \dots 100}$	1,789	-34,38	1,9	13,67	-286	16,7
$\frac{\text{Вод. пар}}{100 \dots 300}$	54,421	-426,07	8,2	1,29	-4,55	0,25
$\frac{\text{Воздух}}{0 \dots 200}$	13,28	89,15	0,94	0,707	-0,25	0,0055
$\frac{\text{Воздух}}{200 \dots 1200}$	13,2	93,15	0,76	0,667	0,066	-0,00016
$\frac{\text{Дым}}{0 \dots 200}$	12,2	83,8	0,96	0,72	-0,35	0,005
$\frac{\text{Дым}}{200 \dots 1200}$	9,368	105,32	0,59	0,6968	-0,14	0,0002

Приближенное решение по уравнению (3)

Согласно уравнению (8) комплекс

$$A_w(14) = 1411 + 21,7 \cdot t - 0,0524 \cdot t^2 = 1704.$$

Точное значение A_w по уравнению (3) дает $A_w^T = 1701$, погрешность в определении комплекса:

$$\Pi_{A_w} = (1 - 1704/1701) \cdot 100 = 0,2\%.$$

Число Прандтля по приближенной формуле табл. 1:

$$Pr_{ж}(14) = 13,67 - 0,286 \cdot t + 0,00167 \cdot t^2 = 9,99; \quad Pr_{ст}(28) = 6,97.$$

Поправка $\varepsilon_T = (9,99/6,97)^{0,25} = 1,094$. Погрешность в определении ε_T :

$$\Pi_{\varepsilon_T} = (1 - 1,094/1,105) \leq 1\%.$$

Окончательно коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = A_w \cdot W^{0,8} \cdot d^{-0,2} \cdot \varepsilon_T = 1704 \cdot 2^{0,8} \cdot 0,016^{-0,2} \cdot 1,094 = 7424 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Погрешность в определении α : $\Pi_{\alpha} = (1 - 7424/7484) = 0,8\%$.

Таким образом, погрешность при расчёте коэффициента теплоотдачи по простым приближенным формулам не превышает 1 % и вполне достаточна для инженерных расчетов.

Выводы

1. Получены простые приближенные зависимости для определения коэффициента теплоотдачи при турбулентном течении четырёх широко распространённых теплоносителей: воды, водяного пара, воздуха и продуктов сгорания среднего состава. Приведенные аппроксимационные зависимости позволяют эффективно проводить аналитический расчет без использования табличных данных теплофизических свойств.

2. На численном примере показано, что погрешность полученных уравнений не превышает 1 %.

3. Данная методика легко может быть распространена на получение аналитических формул для других жидкостей и вида критерияльного уравнения вынужденной конвекции.

Список литературы

1. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973. – 320 с.

2. Горбунов А.Д., Глущенко Е.Л., Хиш Л.И. К аналитическому расчёту суммарного коэффициента теплоотдачи при охлаждении тел на воздухе // Металлургическая теплотехника: Сборник научных тру-

дов НМетАУ. В двух книгах. – Книга первая. – Днепропетровск: Пороги, 2005. – С. 118 – 131.

3. Левин Б.И., Шубин Е.П. Теплообменные аппараты систем теплоснабжения. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 256 с.

Рукопись поступила 03.03.2008 г.