

ЧУЧМАН Г. П.,
инженер

РАСЧЕТ ТЕПЛОТДАЧИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИЕЙ ПО УПРОЩЕННЫМ ЗАВИСИМОСТЯМ

В практике инженерных расчетов, связанных с сельскохозяйственным производством, часто приходится определять коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции. Такие задачи возникают в проектировании инкубаторов, брудеров, водонагревателей, при расчетах на нагрев различных аппаратов и приборов, определении допустимых нагрузок токоведущих частей и т. д. Указанные расчеты затруднены вследствие того, что в справочной литературе отсутствуют простые зависимости, по которым можно было бы легко рассчитать коэффициенты теплоотдачи различных по форме, расположению и условиям охлаждения поверхностей.

Для установившегося режима теплообмена в условиях свободной конвекции данные многочисленных опытов обобщаются критериальными уравнениями вида

$$Nu = c (GrPr)^n, \quad (1)$$

где c и n — эмпирические коэффициенты, зависящие от формы поверхности, ее расположения в поле тяготения и характера течения охлаждающей среды. Характер движения среды около нагретой поверхности в свою очередь характеризуется величиной комплекса $GrPr$. Так, по М. А. Михееву [1], различают 4 режима течения: пленочный ($GrPr < 10^{-3}$), переходный ($GrPr = 10^{-3} — 5 \cdot 10^2$), ламинарный ($GrPr = 5 \cdot 10^2 — 2 \cdot 10^7$) и вихревой ($GrPr > 2 \cdot 10^7$).

Для вычисления критериев Nu (Нуссельта), Gr (Грасгофа) и Pr (Прандтля) необходимо знать температуру поверхности и охлаждающей среды, определяющий линейный размер, характеризующий величину поверхности, а также теплофизические характеристики охлаждающей среды: теплопроводность λ , кинематическую вязкость ν , температуропроводность a . Теплофизические характеристики зависят от температуры и берутся по средней температуре пограничного слоя; их значения приводятся в специальной литературе [2]. Необходимость учета такого

количества данных затрудняет применение критериальных уравнений инженерно-техническим персоналом.

Из уравнения (1) может быть получено выражение для определения среднего по поверхности коэффициента теплоотдачи конвекцией $\bar{\alpha}_k$

$$\bar{\alpha}_k = c \lambda \left(\frac{9,81 \vartheta_w \text{Pr}}{\nu^2 T_m} \right)^n L^{3n-1} \text{ вт/м}^2\text{град}, \quad (2)$$

где L — определяющий размер, м;
 $\vartheta_w = t_w - t_f$ — разность температур поверхности и окружающей среды, град;

$T_m = \frac{t_w + t_f}{2} + 273$ — среднее значение абсолютной температуры пограничного слоя, °К.

Придадим уравнению (2) следующий вид:

$$\bar{\alpha}_k = 9,81^n c L^{3n-1} \vartheta_w^n \cdot A, \quad (3)$$

где комплекс

$$A = \lambda \left(\frac{\text{Pr}}{\nu^2 T_m} \right)^n$$

зависит от средней температуры пограничного слоя. Можно показать, что для заданной охлаждающей среды при ограниченном диапазоне изменения t_w и t_f зависимостью комплекса A от температуры в практических расчетах можно пренебречь.

В качестве примера охлаждающей среды примем воздух при атмосферном давлении. Учитывая, что при длительном режиме работы расчетная температура поверхностей токоведущих частей, корпусов аппаратов, приборов и прочих подобных устройств

Таблица 1

n	Значения комплекса A			$\frac{\Delta A}{A} = \frac{A_{\text{ср}} - A}{A_{\text{ср}}} \cdot 100\%$
	A_1 ($T_m = 350^\circ\text{K}$)	A_2 ($T_m = 298^\circ\text{K}$)	$A_{\text{ср}} = \frac{A_1 + A_2}{2}$	
1/3	5,02	5,65	5,33	-5,9
0,3	2,96	3,29	3,13	-5,0
0,26	1,63	1,74	1,69	+3,0
0,25	1,40	1,47	1,435	+2,0
0,22	0,88	0,91	0,895	+1,7
0,16	0,351	0,346	0,349	+1,0
1/8	0,206	0,197	0,201	+2,5

лежит в пределах 50—120°C при температуре охлаждающего воздуха 0—35°C, получим пределы изменения средней температуры пограничного слоя T_m (298 ÷ 350)°К.

В табл. 1 приведены значения комплекса A для предельных значений средней температуры слоя при различных значениях коэффициента n .

Максимальное отклонение комплекса A от среднего в принятом интервале температур значения $A_{\text{ср}}$ не превосходит 6%, что позволяет приближенно считать $A \approx A_{\text{ср}}$. С учетом предложенных упрощений уравнение (3) можно заменить приближенным

$$\bar{\alpha}_k = c' L^{2n-1} \vartheta_{\omega}^n, \quad (4)$$

где $C' = 9,81^n c A_{\text{ср}}$.

Аналогичными расчетами можно показать, что комплекс

$$\text{GrPr} = \frac{\nu}{a} \cdot \frac{9,81 \vartheta_{\omega} L^3}{\nu^2 T_m} ;$$

характеризующий режим течения среды, можно с достаточной точностью заменить выражением $A' \vartheta_{\omega} L^3$, где

$$A' = \frac{9,81}{(a \nu T_m)_{\text{ср}}} .$$

Входящие в уравнение (4) коэффициенты c' и n для различных поверхностей и при разных режимах течения среды, характеризующихся значением произведения $\vartheta_{\omega} L^3$, даны в табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов c' и n уравнения (4): охлаждающая среда — воздух при $p = 1 \text{ атм}$; $t_{\omega} = 50 \div 120^{\circ}\text{C}$; $t_f = 0 - 35^{\circ}\text{C}$

Характеристика теплоотдающей поверхности	Определяющий размер $L, \text{ м}$	$\vartheta_{\omega} L^3, \text{ м}^3 \text{ град}$	c'	n	Источник, из которого взяты критеральные уравнения
Шар; горизонтальный цилиндр	Диаметр	$2 \cdot 10^{-11} - 8 \cdot 10^{-6}$	0,32	1/8	[1]
		$8 \cdot 10^{-6} - 0,3$	1,4	1/4	
		$> 0,3$	1,5	2/5	
Вертикальная прямоугольная плита; вертикальный цилиндр при $d > 0,05 \text{ м}$	Высота	$2 \cdot 10^{-11} - 8 \cdot 10^{-7}$	0,32	1/8	[1], [5]
		$8 \cdot 10^{-6} - 4,0$	1,4	1/4	
		$> 4,0$	1,5	1/3	
Прямоугольная плоскость неограниченной длины с горизонтально расположенной большей осью, наклоненная под углом $\varphi = 0 \div 60^{\circ}$ к вертикали	Ширина	$8 \cdot 10^{-6} - 0,8$	$1,4 \sqrt{\cos \varphi}$	1/4	[3, 5]

Характеристика теплоотдающей поверхности	Определяющий размер $L, м$	$\theta_{cr} L^3 м^3 град$	c'	n	Источник, из которого взяты критериальные уравнения
Прямоугольная плоскость ограниченной длины с горизонтально расположенной большей осью, наклоненная под углом $\varphi=75^\circ$ с поверхностью, обращенной вверх	Ширина	$8 \cdot 10^{-10} - 0,2$	1,2	0,26	Данные автора [5]
То же, при $\varphi=75^\circ$ с поверхностью, обращенной вниз	Ширина	$8 \cdot 10^{-6} - 30$	1,0	0,22	[4, 5]
То же, при $\varphi=90^\circ$ (горизонтальная плоскость) с поверхностью, обращенной вверх	Ширина	$8 \cdot 10^{-6} - 0,1$	1,45	0,3	Данные автора
То же, при $\varphi=90^\circ$ (горизонтальная плоскость) с поверхностью, обращенной вниз	Ширина	$8 \cdot 10^{-6} - 30$	0,75	0,16	[4, 5]

Подобным путем из критериальных уравнений могут быть получены простые и удобные расчетные уравнения для других частных случаев (иных охлаждающих сред и температурных условий).

Исходные критериальные уравнения для составления табл. 2 взяты по данным М. А. Михеева [1] и автора [3, 4]. Для теплоотдачи прямоугольной плоской поверхности, обращенной вверх, при $\varphi=75^\circ$ и $\varphi=90^\circ$ использованы экспериментальные данные автора, ранее не публиковавшиеся; для $\varphi=75^\circ$

$$Nu = 0,396 (GrPr)^{0,26} ;$$

для $\varphi=90^\circ$ (горизонтальная поверхность)

$$Nu = 0,223 (GrPr)^{0,3}.$$

Сведения о критических значениях комплекса $GrPr$, соответствующих изменению режима течения охлаждающей среды, для плоской поверхности взяты по данным М. П. Еникеева [5], для прочих случаев — по [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Михеев М. А. Основы теплопередачи. Госэнергоиздат, 1956.
2. Теплофизические свойства вещества. Справочник под ред. Варгафтика Н. Б. Госэнергоиздат, 1956.
3. Чучман Г. П. Экспериментальное исследование теплоотдачи наклонной плоской поверхности при естественной конвекции в условиях ламинарного двухмерного потока охлаждающей жидкости. Сборник трудов БИМСХ, Минск, 1965.
4. Чучман Г. П. О допустимых по условиям нагрева токовых нагрузках плоских шин (см. настоящий сборник, стр. 201).
5. Еникеев М. П. Теплоотдача плоской поверхности при различных углах ее наклона в случае свободного движения воздуха. Труды Казанского сельскохозяйственного института, вып. 42-й, 1960.