

УДК 536.24

Л.П. Андреев, канд. техн. наук, проф.,
 В.Р. Никульшин, д-р техн. наук, проф.,
 А.М. Андрищенко, инженер,
 Одес. нац. политехн. ун-т

ОБОБЩЕННОЕ УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ ПУЧКОВ ГЛАДКИХ ТРУБ

Л.П. Андреев, В.Р. Никульшин, А.М. Андрищенко. Узагальнене рівняння тепловіддачі при поперечному обтіканні пучків гладких труб. Запропоновано узагальнене рівняння для розрахунку тепловіддачі при поперечному обтіканні пучків гладких труб. Приведено результати порівняльних розрахунків, як за існуючими, так за запропонованим рівнянням.

L.P. Andreyev, V.R. Nikulshin, A.M. Andryushchenko. The generalized equation of heat-transfer for cross-flow around of bare-tube bank. The generalized equation for calculating heat-transfer for transversal flow around a bare-tube bank is proposed. The results of comparative designs made with both the existing equation and the suggested one are presented.

Расчеты теплоотдачи при вынужденном обтекании теплоносителями трубных пучков выполняются по критериальным уравнениям единой структуры [1, 2, 3]

$$Nu = c Re^n Pr^m \varepsilon_t \varepsilon_\varphi \varepsilon_s, \quad (1)$$

где $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$ — критерий Нуссельта,

$Re = \frac{wl}{\nu}$ — критерий Рейнольдса,

$Pr = \frac{\nu}{a}$ — критерий Прандтля,

$\varepsilon_t = \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,25}$ — поправочный коэффициент на неизотермичность среды,

$\varepsilon_\varphi = 0,145\varphi^{0,45}$ — поправочный коэффициент на угол атаки φ ,

$\varepsilon_s = f\left(\frac{S_1}{d}, \frac{S_2}{d}\right)$ — поправочный коэффициент на отношении шага труб к их диаметру,

c — коэффициент пропорциональности,

n, m — показатели степени,

α — коэффициент теплоотдачи,

l — определяющий размер (диаметр),

λ — коэффициент теплопроводности,

w — линейная скорость теплоносителя,

ν — коэффициент кинематической вязкости,

a — коэффициент температуропроводности.

Здесь рассматриваются следующие критериальные уравнения для пучков труб при $\varepsilon_t = \varepsilon_\varphi = \varepsilon_s = 1$:

1. При $2 \cdot 10^2 \leq Re \leq 2 \cdot 10^5$ для коридорного пучка [1]

$$Nu = 0,26 Re^{0,65} Pr^{0,36}, \quad (2)$$

для шахматного пучка

$$Nu = 0,41 Re^{0,6} Pr^{0,36} . \quad (3)$$

2. При $Re < 10^3$ для коридорного и шахматного пучков [2]

$$Nu = 0,56 Re^{0,5} Pr^{0,36} , \quad (4)$$

при $Re > 10^3$ для коридорного пучка

$$Nu = 0,22 Re^{0,65} Pr^{0,36} , \quad (5)$$

а для шахматного пучка

$$Nu = 0,4 Re^{0,6} Pr^{0,36} . \quad (6)$$

3. При $10^2 < Re < 10^3$ для коридорного пучка [3]

$$Nu = 0,52 Re^{0,5} Pr^{0,36} , \quad (7)$$

при $10^3 < Re < 10^5$

$$Nu = 0,27 Re^{0,63} Pr^{0,36} , \quad (8)$$

при $Re > 2 \cdot 10^5$

$$Nu = 0,033 Re^{0,8} Pr^{0,4} , \quad (9)$$

а для шахматного пучка при $10^2 < Re < 10^3$

$$Nu = 0,71 Re^{0,5} Pr^{0,36} , \quad (10)$$

при $10^3 < Re < 10^5$

$$Nu = 0,41 Re^{0,6} Pr^{0,33} , \quad (11)$$

при $Re > 2 \cdot 10^5$

$$Nu = 0,031 Re^{0,8} Pr^{0,4} . \quad (12)$$

Не отдавая предпочтения ни одной из приведенных групп критериальных уравнений, полученных путем соответствующей обработки экспериментальных данных, можно обобщить методом наименьших квадратов результаты расчетов по этим уравнениям следующими двумя:

для коридорного пучка при $Re \geq 10^2$

$$Nu = (1,4 + 0,17 Re^{0,68}) Pr^{0,36} , \quad (13)$$

для шахматного пучка при $Re \geq 10^2$

$$Nu = (1,0 + 0,29 Re^{0,63}) Pr^{0,36} . \quad (14)$$

В табл. 1 приведены расчетные данные $Nu = f(Re, Pr)$ по уравнению (13), а в табл.2 — по (14) для $10^2 \leq Re \leq 10^6$ при $Pr = 0,5; 1,0$ и 1000 .

Таблица 1

Значения Nu для коридорных пучков в зависимости от Re и Pr по (13)

Re \ Pr	10^2	$2 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2$	10^3	10^4	10^5	$2 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	10^6
0,5	4,13	5,95	10,2	15,6	70,6	334	534	995	1590
1,0	5,29	7,64	13,0	20,0	90,6	428	686	1280	2050
1000	63,7	91,8	157	241	1090	5150	8240	15400	24600

Таблица 2

Значения Nu для шахматных пучков в зависимости от Re и Pr по (14)

$Re \backslash Pr$	10^2	$2 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2$	10^3	10^4	10^5	$2 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	10^6
0,5	4,89	7,14	12,1	18,3	75,6	320	495	881	1360
1,0	6,28	9,17	15,5	23,5	97,0	411	635	1130	1750
1000	75,5	110	187	283	1170	4940	7600	13600	21000

Для сравнения приведенных в таблицах 1 и 2 расчетных данных по (13) и (14) в табл. 3 приводятся расчетные значения $Nu = f(Re, Pr)$ по приведенным критериальным уравнениям для коридорных и шахматных пучков труб [1, 2, 3].

Таблица 3

Значения Nu для пучков труб в зависимости от Re и Pr

$Re \backslash Pr$	10^2	$2 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2$	10^3	10^4	10^5	$2 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	10^6
коридорные пучки (по [1])									
0,5	—	6,34	11,5	18,1	80,6	360	565	—	—
1,0	—	8,14	14,8	23,2	104	462	726	—	—
1000	—	97,9	178	279	1240	5560	8720	—	—
шахматные пучки (по [1])									
0,5	—	7,67	13,3	20,2	80,2	319	484	—	—
1,0	—	9,81	17,1	25,9	103	410	621	—	—
1000	—	118	205	311	1240	4930	7470	—	—
коридорные пучки (по [2])									
0,5	4,36	6,17	9,67	$\begin{matrix} 15,3 \\ 13,8 \end{matrix}$	68,2	305	478	868	1360
1,0	5,60	7,92	12,5	$\begin{matrix} 19,6 \\ 17,7 \end{matrix}$	87,6	391	614	1110	1750
1000	67,3	95,2	151	$\begin{matrix} 236 \\ 213 \end{matrix}$	1050	4700	7380	13400	21000
шахматные пучки (по [2])									
0,5	4,36	6,17	9,76	$\begin{matrix} 19,7 \\ 13,8 \end{matrix}$	78,3	312	472	819	1240
1,0	5,60	7,92	12,5	$\begin{matrix} 25,2 \\ 17,7 \end{matrix}$	100	400	606	1050	1590
1000	67,3	95,2	151	$\begin{matrix} 303 \\ 213 \end{matrix}$	1210	4810	7290	12600	19100
коридорные пучки (по [3])									
0,5	4,05	5,73	9,06	$\begin{matrix} 16,3 \\ 12,8 \end{matrix}$	69,6	$\begin{matrix} — \\ 297 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 435 \\ — \end{matrix}$	995	1590
1,0	5,20	7,35	11,6	$\begin{matrix} 21,0 \\ 16,4 \end{matrix}$	89,4	$\begin{matrix} — \\ 381 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 575 \\ — \end{matrix}$	1280	2050
1000	62,5	88,4	140	$\begin{matrix} 252 \\ 198 \end{matrix}$	1070	$\begin{matrix} — \\ 4950 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 9110 \\ — \end{matrix}$	15400	24600
шахматные пучки (по [3])									
0,5	5,53	7,82	12,4	$\begin{matrix} 20,6 \\ 17,5 \end{matrix}$	81,9	$\begin{matrix} — \\ 326 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 409 \\ — \end{matrix}$	851	1480
1,0	7,10	10,0	15,9	$\begin{matrix} 25,9 \\ 22,5 \end{matrix}$	103	$\begin{matrix} — \\ 410 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 540 \\ — \end{matrix}$	1120	1960
1000	85,4	121	191	$\begin{matrix} 253 \\ 270 \end{matrix}$	1010	$\begin{matrix} — \\ 4010 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 8550 \\ — \end{matrix}$	17800	31000

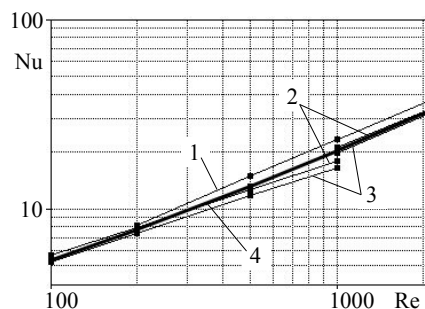


Рис. 1. Зависимость критерия Nu для коридорных пучков от критерия Re при $Pr = 1$: 1 — по [1]; 2 — по [2]; 3 — по [3]; 4 — по предложенному уравнению (13)

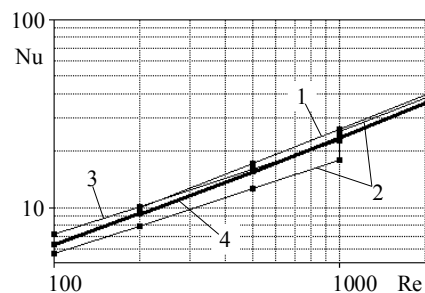


Рис. 2. Зависимость критерия Nu для шахматных пучков от критерия Re при $Pr = 1$: 1 — по [1]; 2 — по [2]; 3 — по [3]; 4 — по предложенному уравнению (14)

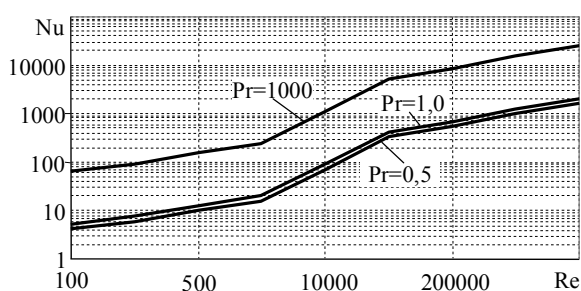


Рис. 3. Зависимость значения критерия Nu для коридорных пучков от критериев Re и Pr по данным таблицы 1

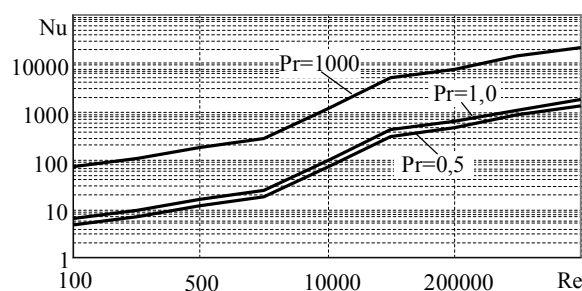


Рис. 4. Зависимость значения критерия Nu для шахматных пучков от критериев Re и Pr по данным таблицы 2

Анализ приведенных здесь табличных данных свидетельствует о преимуществах уравнений (13) и (14) по сравнению с аналогичными [1, 2, 3] и позволяет сделать следующие выводы:

- расширена по сравнению с [1] граница использования уравнений ($Re \geq 10^2$ вместо $2 \cdot 10^2 \leq Re \leq 2 \cdot 10^5$);
- наличие по одному уравнению для каждого вида трубного пучка вместо двух [2] и трех [3] исключает неоднозначность результатов вычислений при $Re = 10^3$ с неизбежной погрешностью до 40 % [2] и до 25 % [3] (см. рисунки 1 и 2);
- непрерывность функций $Nu = f(Re)$ по всему полю Re по сравнению с [3], прерывающихся в промежутке от $Re = 10^5$ до $Re = 2 \cdot 10^5$ (см. рисунки 3 и 4).

Литература

1. Лабай В.Й. Тепломассообмін: Підруч. для ВНЗ. — Львів: Тріада Плюс, 1998. — 260 с.
2. Кулинченко В.Р. Справочник по теплообменным расчетам. — К.: Техника, 1990. — 165 с.
3. Погорелов А.И. Тепломассообмен (основы теории и расчета): Учеб. пособие для вузов. — Одесса: Черноморье, 1999. — 128 с.

Поступила в редакцию 7 ноября 2005 г.