

УДК 66.045 : 536.244

РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО КОНТАКТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРУБ С НАВИТЫМИ ЗАВАЛЬЦОВАННЫМИ РЕБРАМИ

В. Б. КУНТЫШ, В. И. МЕЛЕХОВ, Л. М. ФЕДОТОВА,
Н. М. КУЗНЕЦОВ

Архангельский лесотехнический институт

В современных конструкциях лесосушильных камер основной элемент, определяющий их энергетическую эффективность, — калориферы. Для применения в калориферах наиболее перспективны трубы, оребренные навитой алюминиевой лентой, основание которой завальцовано роликом в спиральную однозаходную канавку на несущей трубе (рис. 1, а) или отбортовано в виде горизонтальной полки с образованием *L*-ребра (рис. 1, б), наматываемого под натяжением на несущую трубу как с гладкой поверхностью, так и с накатанными на ней продольными бороздками.

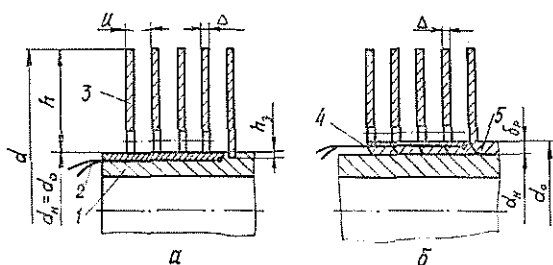


Рис. 1. Типы труб: а — с навитыми завальцованными ребрами; б — с *L*-образными ребрами; 1 — несущая труба; 2 — термопара для измерения температуры под основанием ребра; 3 — ребро; 4 — термопара для измерения температуры у основания ребра; 5 — основа ребра (полка) ребра

Такие калориферы с большой эффективностью можно применять в теплорекуператорах сушильных камер непрерывного действия, в производстве фанеры и древесноволокнистых плит, в бумаго- и картоноделательных машинах, в «сухих» градирнях лесохимического и гидролизного производств.

Пучки труб с ребрами из ленты расходуют в 2 раза меньше алюминия и имеют аэродинамическое сопротивление в среднем на 35...40 % ниже по сравнению с пучками из биметаллических труб, оребренных накатными (экструзированными) алюминиевыми ребрами. Однако количественное соотношение между указанными типами ребристых труб, применяемых, например, для изготовления пучков серийных аппаратов воздушного охлаждения (АВО), приблизительно следующее: 75...80 % составляют трубы с накатными ребрами и лишь 20 % — оребренные лентой.

Сложившаяся ситуация частично объясняется принятым подходом к исследованию средних теплоаэродинамических характеристик пучков труб, оребренных лентой [1, 3, 4, 7, 8]. В этих исследованиях определены общий приведенный коэффициент теплоотдачи, включающий и тепловую проводимость контакта несущая труба — ребро для всех типоразмеров промышленных труб. Величина, обратная тепловой проводимости контакта, — термическое контактное сопротивление (ТКС), обусловленное температурным перепадом в зоне завальцовки ребра из-за отсутствия гомогенного соединения. ТКС зависит от глубины и усилия

завальцовки ребра, физико-механических свойств сопрягаемых материалов, температуры греющей среды, принятой технологии завальцовки ребра. Собственно приведенный коэффициент теплоотдачи ребристой поверхности — функция параметров оребрения. Поэтому полученные частные критериальные уравнения теплоотдачи для конкретных типоразмеров пучков труб не пригодны для построения обобщенных критериальных уравнений.

Цель исследования — разработать метод выделения ТКС из общего экспериментально измеренного сопротивления теплопереходу внутри ребер через их поверхность и контактную зону труб, оребренных навитой завальцованной лентой, а также определить значения ТКС для различных технологических параметров ребра и трубы.

Величину ТКС (R_k , $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$) в общем случае определяют из выражения

$$R_k = \Delta T_k / q_k, \quad (1)$$

где ΔT_k — температурный перепад на механическом контакте ребро — стенка несущей трубы, К;
 $q_k = Q / F_k$ — плотность теплового потока через контактную зону, Вт/м²;
 Q — тепловой поток, проходящий через ребристую поверхность, Вт;
 F_k — площадь поверхности контакта завальцованного ребра, м².

Небольшая глубина завальцовки ребра исследованных труб [3, 4, 7, 8] h_z , равная приблизительно 0,3 мм, затрудняет надежное и достоверное прямое измерение температурного перепада ΔT_k , а следовательно, определение ТКС по формуле (1). Значительное число геометрических и физико-механических параметров, влияющих на ТКС, не учитывается в полном объеме даже современной теорией [9], что снижает возможности ее использования при расчетах теплового сопротивления контакта ребристых труб.

В трубчато-ребристых теплообменниках с насадными ребрами для определения R_k [5, 6] используют метод сравнительных испытаний теплопередачи теплообменников из труб идентичной геометрии, но отличающихся методом обеспечения механического контакта между ребром и трубой. Однако в этой методике требуется одновременно определять термическое сопротивление теплоотдачи от оребрения к воздуху и от греющей среды к внутренней поверхности трубы. В таком виде предлагаемый метод не удастся реализовать для выделения ТКС завальцованных ребер из средних теплообменных характеристик исследованных пучков труб, оребренных лентой [1, 3, 4, 7, 8]. В проведенных исследованиях этих пучков отсутствуют данные по коэффициентам теплопередачи и внутренней теплоотдачи.

Эти ограничения устранены в разработанном нами методе определения ТКС применительно к завальцованным ребрам. Метод также базируется на принципе сравнительных тепловых исследований по единой методике на одной экспериментальной установке при вынужденной конвекции пучков из ребристых труб идентичной или близких геометрии и формы оребрения.

Исследования проведены в одинаковом диапазоне изменения температуры воздуха и его скорости, что удовлетворяет условию соблюдения геометрического, теплового и гидромеханического подобия опытных пучков. Средний приведенный коэффициент теплоотдачи α пучка труб с завальцованными ребрами определяют с учетом термической проводимости контакта. В этом случае термопары для измерения средней температуры стенки несущей трубы $t_{ст}$ закладывают под основание завальцованного ребра (рис. 1, а), а температурный напор для вычисления α принимают равным $t_{ст} - t_1$ (здесь t_1 — средняя температура потока воздуха, набегающего на трубу-калориметр).

Результаты опытов представлены в критериях подобия и описаны критериальным уравнением вида

$$Nu = f(Re). \quad (2)$$

Анализ литературных источников показал, что наиболее близкий аналог труб с завальцованными ребрами — трубы с навитыми под натяжением L -образными ребрами (рис. 1, б) из алюминиевой ленты, которые имеют идентичную геометрию. Размеры ребер позволяют измерить среднюю температуру основания ребра $t_{0,p}$ термомпарами, заложенными в полку L -ребра [2]. По температурному напору $t_{0,p} - t_1$ вычисляют средний приведенный коэффициент теплоотдачи α' без учета R_k пучка-аналога. Опытные данные описывают критериальным уравнением

$$Nu' = f(Re), \quad (3)$$

где $Nu' = \frac{\alpha' d_0}{\lambda}$, $Nu = \frac{\alpha d_0}{\lambda}$ — числа Нуссельта в формулах (3) и (2);

$$Re = \frac{\omega d_0}{\nu} \text{ — число Рейнольдса;}$$

ω — скорость воздуха в узком сечении пучка, м/с;

d_0 — диаметр по основанию ребер, м.

Физические константы воздуха λ , ν принимают по его средней температуре t в пучке.

Аналитическую связь между α' , α и R_k при $Re = \text{const}$ и $t = \text{const}$ или $t_1 = \text{const}$ устанавливают с помощью выражения

$$\frac{1}{\alpha\varphi} = \frac{1}{\alpha'\varphi} + R_k \frac{d_0}{d_n} + \frac{\delta_p}{\lambda_p} \frac{d_0}{d_n} \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}; \quad (4)$$

представляя (4) в безразмерной форме, получим:

$$\frac{1}{Nu_y} = \frac{1}{Nu'_y} + \frac{1}{Nu_k} \frac{d_0}{d_n} + \frac{\lambda}{\lambda_p} \frac{\delta_p}{d_n}, \quad (5)$$

где $Nu_y = Nu \varphi$; $Nu'_y = Nu' \varphi$ — числа Нуссельта, отнесенные к площади поверхности трубы, вычисленной по d_0 ;

d_n — наружный диаметр несущей трубы;

φ — коэффициент оребрения трубы;

λ_p — коэффициент теплопроводности материала ребра;

δ_p — толщина основания ребра;

$Nu_k = \frac{\alpha_k d_0}{\lambda}$ — условное число Нуссельта, характеризующее интенсивность контактного теплообмена;

$\alpha_k = 1/R_k$ — коэффициент тепловой проводимости контакта, Вт/(м² · К).

Применительно к геометрическим параметрам завальцованных ребер и температурным условиям их эксплуатации величина безразмерного комплекса $\frac{\lambda}{\lambda_p} \frac{\delta_p}{d_n}$ на два порядка меньше по сравнению с возможными значениями комплекса $\frac{1}{Nu_k} \frac{d_0}{d_n}$ и на два-три порядка меньше значений $\frac{1}{Nu_y}$ и $\frac{1}{Nu'_y}$. Поэтому при вычислениях R_k можно пренебречь влиянием третьего члена в формулах (4), (5) и пользоваться выражением

$$\frac{1}{Nu_y} \approx \frac{1}{Nu'_y} + \frac{1}{Nu_k} \frac{d_0}{d_n}. \quad (6)$$

Точность определения R_k изменится на относительную ошибку, не превышающую $\pm 0,6\%$.

Следовательно, при известной геометрии оребрения и наличии критериальных уравнений для Nu' и Nu сравниваемых пучков нахождение R_k не представляет затруднений.

Таблица 1

Параметры оребрения труб

№ пучка	Размер ребер, мм					φ	Исходное уравнение	Источник
	d	h	u	Δ	h_3			
1	56,44	15,72	2,53	0,325	0,3	21,41	$Nu = 0,292 Re^{0,515}$	[1]
2	55,28	15,14	2,53	0,325	0,5	20,37	$Nu = 0,172 Re^{0,585}$	[1]
3	55,74	15,37	2,53	0,325	0,7	20,27	$Nu = 0,233 Re^{0,547}$	[1]
4	56,4	15,3	2,5	0,22	—	20,59	$Nu' = 0,218 Re^{0,58}$	[2]

Прямое приложение метода осуществлено для определения R_k оребренных алюминиевой завальцованной лентой труб, теплоэродинамические характеристики шахматных пучков № 1—3 (табл. 1) из которых приведены в работе [1]. Шахматный пучок-аналог № 4 в табл. 1 состоял из труб с L -ребрами. Трубы в пучках размещены по вершинам равнобедренного треугольника с поперечным шагом $S_1 = 59$ мм и средндиагональным шагом $S'_2 = S_1$. Несущая труба в пучках № 1—4 выполнена из стали 10 с наружным диаметром $d_n = 25$ мм.

По формулам (4), (5) и данным табл. 1 рассчитаны численные значения ТКС труб пучков № 1—3, которые приведены на рис. 2 для различных значений числа Re ($Re = var$) в зависимости от глубины завальцовки ребра.

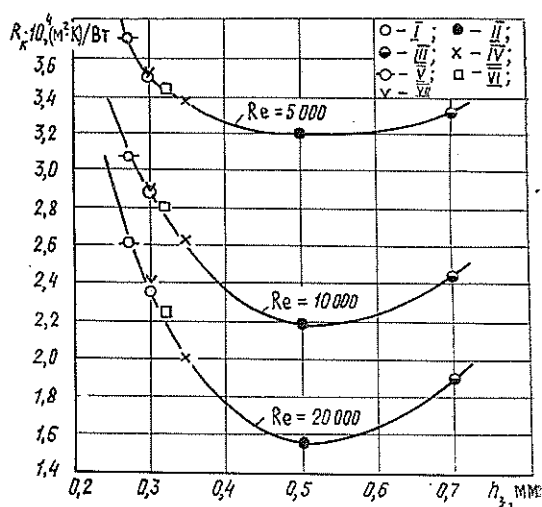


Рис. 2. Графики для определения ТКС в зависимости от глубины завальцовки ребра: I, II, III — пучки труб № 1—3 (по табл. 1); IV, V, VI, VII — пучки труб № 1—4 (по табл. 2)

В наших работах [3, 4, 7, 8] исследованы шахматные шестирядные пучки с шагом $S_1 = S'_2 = 59$ мм из труб (оребранных алюминиевой завальцованной лентой толщиной $\Delta = 0,3$ мм) одинаковых размеров ($d = 57$ мм; $d_n = 25$ мм; $h = 16$ мм), но отличающихся шагом ребер и коэффициентом оребрения. Эти параметры были соответственно равны: $u = 4,23; 3,63; 3,175; 2,53$ мм, а $\varphi = 13,5; 15,4; 17,7; 22$. Опытные данные по теплоотдаче измерены с учетом R_k и обработаны в виде уравнения (2). Однако в известных публикациях для рассматриваемой партии труб

не обнаружены пучки-аналоги, удовлетворяющие требованиям примененного метода определения ТКС. Поэтому значения R_k для пучков труб № 1—3 приняты базовыми и метод трансформирован в следующем направлении.

Для труб-калориметров [3, 4, 7, 8] была определена с точностью $\pm 0,01$ мм глубина завальцовки ребра (табл. 2).

Таблица 2

Расчетные и опытные характеристики пучков из труб [3, 4, 7, 8]

№ пучка	φ	h_3 , мм	$R_k \cdot 10^4$, (м ² · К)/Вт			τ , Н/мм ²	Полученные уравнения вида (3)
			Re = 5 000	Re = 10 000	Re = 20 000		
1	13,5	0,35	3,39	2,62	2,05	1,55	$Nu' = 0,195 Re^{0,61}$
2	15,4	0,27	3,70	3,05	2,60	0,51	$Nu' = 0,157 Re^{0,61}$
3	17,7	0,32	3,44	2,80	2,24	1,27	$Nu' = 0,154 Re^{0,61}$
4	22	0,30	3,50	2,90	2,40	0,92	$Nu' = 0,149 Re^{0,61}$

Для труб № 1—3 (табл. 1) по данным рис. 2 для каждого $Re = \text{const}$ в логарифмических координатах строили зависимость $R_k = f(h_3)$, а затем по замеренным h_3 пучков труб № 1—4 (табл. 2) определяли сопряженные им значения R_k . Установленные таким образом числа R_k приведены в табл. 2, а также ими дополнен рис. 2.

Увеличение глубины завальцовки вызывает снижение ТКС, которое достигает наименьшего значения в окрестности $h_3 = 0,5$ мм. Например, с ростом h_3 от 0,3 до 0,5 мм величина ТКС уменьшается в среднем в 1,1 раза при $Re = 5 000$ и в 1,5 раза при $Re = 20 000$. Но при $h_3 > 0,5$ мм наблюдается рост значений R_k , что можно объяснить возникновением воздушных зазоров [1] по периметру завальцованной части ребра в угловых точках его соприкосновения с несущей трубой. Зазоры уменьшают фактическую площадь механического контакта. Это подтверждается прямыми измерениями усилия вырыва сектора ленты (рис. 3, б) для исследованных труб.

На каждой трубе-калориметре длиной 400 мм вырезали шесть секторов с углом 90° и с помощью динамометра (погрешность ± 2 Н) измеряли усилие вырыва P ленты из канавки. Усредненные значения P , как среднеарифметические из измеренных, изображены на рис. 3, а для сопряженных им величин h_3 . Кривая $P = f(h_3)$ качественно повторяет ход кривой $R_k = f(h_3)$ и результаты вычисленных значений R_k хорошо коррелируются как по h_3 , так и P . Действительно, для $h_3 = 0,7$ мм усилие P снизилось в 1,4 раза по отношению к значению P для $h_3 = 0,5$ мм. Совместный анализ рис. 2 и 3 указывает на превалирующее

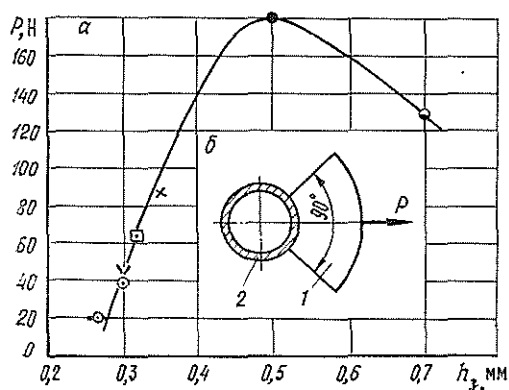


Рис. 3. Зависимость (а) усилия вырыва сектора ребра (б) от глубины завальцовки: 1 — сектор ребра; 2 — несущая труба; остальные обозначения те же, что на рис. 2

влияние глубины завальцовки в изменении R_k по сравнению с усилием вырыва. Увеличение h_3 в 1,07 раза (трубы № 3, 4 в табл. 2) вызвало максимальное снижение ТКС на 7 %, несмотря на возрастание P в 1,53 раза. Усилие вырыва (завальцовки) ребра зависит от большого числа параметров и факторов: степени износа обжимных роликов, механических свойств материалов, шероховатости ленты, в учете непосредственного влияния которых на изменение P и R_k нет необходимости.

Совместное влияние P и h_3 на R_k компромиссно учитывают касательным напряжением τ , Н/мм², вырыва в зоне завальцовки

$$\tau = P/f_r \quad (7)$$

Площадь поверхности геометрического контакта ребра с трубой

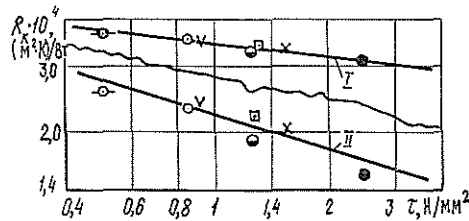
$$f_r = \frac{\pi}{2} [d_n^2 - (d_n - 2h_3)^2] \quad (8)$$

Для труб № 1—3 (табл. 1) значения τ равны 0,855; 2,44 и 1,25 Н/мм².

Введение параметра τ позволило (рис. 4) с относительной погрешностью ± 9 % описать ТКС анализируемых труб уравнением

$$R_k \cdot 10^4 = c\tau^{-n} (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт} \quad (9)$$

Рис. 4. Зависимость ТКС завальцованных ребер от напряжения вырыва; I — Re = 5 000; II — Re = 20 000; остальные обозначения те же, что на рис. 2



Показатели степени n для Re, равных 5 000; 10 000 и 20 000, принимают соответственно равными 0,13; 0,23 и 0,32. Постоянная c для указанных Re равна 3,46; 2,80 и 2,24.

Относительная квадратичная погрешность вычисления абсолютных значений R_k разработанным методом не превышает $\pm 10,5$ %.

Таким образом, для труб № 1—4, используя полученные значения R_k , определены по (4) коэффициенты теплоотдачи α' , далее Nu' и получены критериальные уравнения теплообмена (табл. 2). Исключение R_k из уравнений подобия привело к постоянному показателю степени, равному 0,61 при Re, что соответствует ребрам одинаковой высоты и толщины, а также косвенно характеризует корректность метода выделения R_k из общего термического сопротивления приведенной теплоотдачи.

ЛИТЕРАТУРА

[1]. Исследование влияния геометрических и технологических параметров навитых завальцованных ребер на теплоотдачу и аэродинамическое сопротивление пучков труб/ В. Б. Кунтыш, А. Э. Пинр, М. А. Топоркова и др.// Энергетика.— 1980.— № 10.— С. 65—70. (Изв. высш. учеб. заведений). [2]. Исследование теплоаэродинамических характеристик пучков труб различных материальных исполнений и форм оребрения: Науч. отчет/ Арханг. лесотехн. ин-т; Руководитель В. Б. Кунтыш.— Инв. № Б911123.— Архангельск, 1980.— 78 с. [3]. Кунтыш В. Б., Федотова Л. М., Кузнецов Н. М. Влияние геометрии пучка оребренных труб на теплоотдачу и сопротивление// Холодильная техника.— 1981.— № 8.— С. 25—28. [4]. Кунтыш В. Б., Федотова Л. М., Кузнецов Н. М. Теплообмен и сопротивление оребренных труб пучков с

неравномерными шагами в аппаратах воздушного охлаждения// Энергетика.— 1982.— № 5.— С. 60—65. (Изв. высш. учеб. заведений). [5]. Прозорова Т. В., Сутырина Т. М. О влиянии теплового сопротивления контакта на теплотехнические характеристики аппаратов// Расчет и экспериментальное исследование холодильных и компрессорных машин: Темат. сб. тр. ВНИИхолодмаш.— М., 1982.— С. 134—141. [6]. Сасин В. И. К вопросу определения термического сопротивления контакта в ребристых отопительных приборах// Новое санитарно-техническое оборудование.— М.: НИИсантехника, 1978.— № 50.— С. 5—11. [7]. Федотова Л. М. Тепловые и аэродинамические характеристики шахматных пучков оребренных труб аппаратов воздушного охлаждения// Рациональное использование и восстановление природных ресурсов на Европейском Севере: Тез. докл. к науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов 11—13 ноября 1980 г.— Архангельск: Арханг. лесотехн. ин-т, 1980.— С. 96. [8]. Федотова Л. М., Кунтыш В. Б., Кузнецов Н. М. Теплоотдача и сопротивление пучков, оребренных навитой лентой, труб аппаратов воздушного охлаждения с различным числом рядов// Энергетика.— 1980.— № 5.— С. 112—115. (Изв. высш. учеб. заведений). [9]. Gardner K. A., Carnavos T. C. Thermal-Contact Resistance in Finned Tubing// J. Heat Transfer.— 1960, November.— 82.— P. 279—293.

Поступила 14 апреля 1986 г.