

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ТЕПЛООБМЕНА БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБ С KLM-РЕБРАМИ

**Пиир А.Э.<sup>1</sup>, Кунтыш В.Б.<sup>2</sup>, Володин В.И.<sup>2</sup>, Миннигалиев А.Ш.<sup>3</sup>, Мулин В.П.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Северный арктический федеральный университет, г. Архангельск, Россия,

<sup>2</sup>Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь,

<sup>3</sup>ЗАО "Октябрьскхиммаш", г. Октябрьский, Республика Башкортостан, Россия

Биметаллические ребристые трубы (БРТ) со спиральными алюминиевыми ребрами являются основным типом теплопередающей поверхности аппаратов воздушного охлаждения (АВО) нефтеперерабатывающей, химической, пищевой промышленности и газотранспортных систем. Расширенное применение в теплообменных секциях АВО труб с KLM-ребрами, несмотря на убедительные преимущества [1] по энергетическим и объемно-массовым показателям, а также наличие высокопроизводительной ресурсо- и энергосберегающей технологии [2] для их производства, освоенной ЗАО "Октябрьскхиммаш", сдерживается отсутствием данных по контактному теплообмену. В теплообменных трубах с KLM-ребрами контакт между соприкасающимися поверхностями (наружной трубы и внутренней горизонтальной полки ребра) осуществляется посредством отбортовки, образованной в основании ребер при прокатывании заготовки ребер из теплопроводной пластичной тонкой ленты прямоугольного поперечного сечения в профилирующих роликах. Для обеспечения контакта в технологии изготовления [2] предусматривается создание на поверхности несущей трубы искусственной шероховатости в виде рифлений "бороздка-выступ" небольших глубины и ширины, нанесенных по продольным концентрическим образующим трубы с шагом 1–2,5 мм. В последующем при изготовлении теплообменной трубы механическое соединение (сцепление) оснований горизонтальной отбортованной полки ребра достигается пластической деформацией отбортовок роликами, имеющими зубчатый профиль искусственной шероховатости на поверхности несущей трубы. Формирование исходной ленты в спираль выполняют предварительно операцией ее прокатки между роликами. При этом ребра приобретают трапециевидный профиль.

Интенсивность теплообмена в зоне контакта характеризуется контактными термическим сопротивлением (КТС),  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ :

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

или теплопроводимостью контакта,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ :

$$\alpha_k = 1/R_k \quad (2)$$

Теоретический расчет достоверных значений  $R_k$  для БРТ с KLM-ребрами на сегодняшний день не представляется возможным, и основным способом является экспериментальное определение по предложенной в [3] методике.

Выясним влияние КТС на коэффициент теплопередачи БРТ с KLM-ребрами, выполненными из алюминиевой ленты. Расчет выполнен для следующих параметров трубы и ребер: несущая стальная труба наружного диаметра  $d_k = d_n = 25$  мм, внутренний диаметр  $d_1 = 21$  мм; диаметр ребра по его основанию  $d_0 = d - 2h = 25,6$  мм; высота и шаг ребра  $h = 15$ ,  $s = 2,5$  мм, средняя толщина ребра  $\Delta = 0,3$  мм. Коэффициент оребрения трубы  $\varphi = 20$ , а коэффициент

увеличения площади поверхности  $\psi = \varphi \cdot d_0 / d_1 = 26,6$ . Подобные БРТ широко применяются в АВО нефтеперерабатывающей промышленности.

Пусть скорость воздуха в сжатом сечении шахматного пучка  $w_2 = 10$  м/с, которой соответствует приведенный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2 = 50$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), коэффициент теплоотдачи с внутренней стороны трубы в АВО составляет  $\alpha_1 \approx 2500$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Коэффициент теплопередачи БРТ имеет вид [4]

$$k = 1/R_{\Sigma} = (R_1 + R_{ст} + R_{зк} + R_{ал} + R_2)^{-1}. \quad (2)$$

Приведенное сопротивление зоны контакта равно, м<sup>2</sup>·К/кВт:

$$R_{зк} = R_k \cdot \varphi \cdot d_0 / d_k = 4,25 \cdot 10^{-3}. \quad (3)$$

Результаты расчета сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Термическое сопротивление	Размерность	Изменения значений $R_{зк}$		
		Нулевое	Минимальное	Максимальное
$R_1$	м <sup>2</sup> ·К/кВт	10,0	10,0	10,0
$R_{ст}$	м <sup>2</sup> ·К/кВт	1,1	1,1	1,1
$R_{зк}$	м <sup>2</sup> ·К/кВт	0,00	4,25	10,0
$R_{ал}$	м <sup>2</sup> ·К/кВт	0,083	0,083	0,083
$R_2$	м <sup>2</sup> ·К/кВт	20,0	20,0	20,0
$R_{\Sigma}$	м <sup>2</sup> ·К/кВт	31,2	35,4	41,2
$k$	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	32,0	28,2	24,0
$\alpha_2^{KTC}$	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	50,0	41,0	33,0

Анализ данных таблицы показывает, что наибольшее сопротивление теплопередаче в БРТ оказывает термическое сопротивление по воздушной стороне (порядка 55%), по стороне охлаждаемого продукта порядка 30%, около 12% термическое сопротивление зоны контакта, приблизительно 3% сопротивление стальной стенки и около 0,2% сопротивление алюминиевой оболочки из горизонтальных L-полок ребра. При  $R_k = 0,2 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>·К/Вт коэффициент теплопередачи  $k = 28,2$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), что было бы равноценно при  $R_k = 0$  м<sup>2</sup>·К/Вт значению  $k = 41$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Уменьшение КТС зоны контакта до нуля позволяет увеличить коэффициент теплопередачи на 15% и сэкономить такое же количество теплообменных труб. Рост КТС со статически наиболее встречаемого  $R_{зк} = 4$  м<sup>2</sup>·К/Вт до максимального значения 10 м<sup>2</sup>·К/Вт, зафиксированного при повышении температуры стенки несущей трубы до 350°С, сопровождается уменьшением интенсивности теплопередачи до 24 Вт/(м<sup>2</sup>·К), то есть еще на 15%.

Из этого примера наглядно видна актуальность задачи интенсификации контактного теплообмена в БРТ, при этом существенное повышение энергетической эффективности АВО реализуется без дополнительных затрат мощности вентилятора на прокачивание воздуха через межтрубное пространство теплообменной секции. На величину  $R_k$  оказывает существенное влияние плотность механического соединения полки L-ребра с поверхностью несущей трубы, которая зависит от увеличения площади поверхности контакта рифлений, оцениваемой коэффициентом

$$m = (S_n + 2h_n) / S_n. \quad (4)$$

Оптимальными являются  $S_n \times h_n = 0,7 \times (0,2 - 0,25)$  мм с  $m \approx 1,6 - 1,7$ . Ребра навиты на стальной трубе наружного диаметра  $d_n = 25$  мм. Среднее значение КТС в интервале температуры контактной зоны  $t_k = 50 - 95$  °С составило  $R_k = 0,25 \pm 0,01$  м<sup>2</sup>·К/кВт для БРТ с коэффициентом оребрения трубы  $\varphi = 16,55$  при шаге ребра  $s = 3,15$  мм и толщине  $\Delta = 0,3$  мм.

Для сетчатой ромбовидной насечки, образованной двумя непрерывными рисками, глубиной  $h_n = 0,2$  мм и шагом  $S_n = 1$  мм, перекрещивающихся под углами 30°С и 60°С к образующей трубы для  $t_k = 35 - 95$  °С экспериментально определено  $R_k = 0,14 \pm 0,03$  м<sup>2</sup>·К/кВт. Оно получено для труб с  $s = 3,125$  мм и  $\Delta = 0,3$  мм при  $\varphi \approx 11,3$ . Сетчатая ромбовидная насечка на поверхности несущей стальной трубы обеспечивает более надежное механическое соединение, чем используемая насечка в виде продольных рельефов.

Влияние контактного давления на КТС проявляется через особенности технологий ВНИИПТХНА (г. Волгоград) и ЭНИКмаш (г. Воронеж) [4] при изготовлении труб с KLM-ребрами.

Выполнено исследование КТС труб с KLM-ребрами, изготовленных по технологии ВНИИПТХНА (г. Волгоград), следующих параметров  $d \times h \times s \times \Delta = 56,2 \times 15,2 \times 2,33 \times 0,25$  мм,  $\varphi = 21,92$  с рифлениями бороздка-выступ  $h_n \approx 0,14 - 0,17$  мм,  $S_n = 0,6$  мм. Рифления накатаны на стальной несущей трубе  $d_k = d_n = 24,8$  мм. Получены значения КТС при  $q_k = 30$  кВт/м<sup>2</sup> –  $R_k = 0,149$  м<sup>2</sup>·К/кВт. Для БРТ с приблизительно одинаковыми параметрами трубы и ребер, но изготовленных по технологии ЭНИКмаш (г. Воронеж), контактное термическое сопротивление (м<sup>2</sup>·К/кВт) вычисляется по формуле:

$$R_k = 1,51 q_k^{0,646}. \quad (5)$$

Различия между трубами ЭНИКмаш и ВНИИПТХНА заключалось в том, что первые имели двухзаходное спиральное KLM-ребро. Сравнение данных показывает, что КТС для труб ВНИИПТХНА больше лишь на 17% при малых  $q_k$ , но при больших  $q_k$  расхождение возрастает до 60%. Следовательно, двухзаходность оребрения повышает надежность механического соединения.

Исследование влияния высокотемпературного прогрева несущей трубы паром давлением 0,13 МПа и температурой 545 °С на КТС KLM-ребер осуществлялось на трех образцах (№1, 2, 3) с параметрами  $d_0 \times h \times s \times \Delta = 25,8 \times 11,1 \times 3,125 \times 0,3$  мм;  $\varphi = 11,5$ . Несущая труба – стальная. Температура струи пара на выходе соответственно 313, 330 и 375 °С. Снаружи труба охлаждалась принудительным перпендикулярным потоком воздуха. Получены следующие значения КТС для указанных условий: до подогрева – 0,15; 0,1; 0,15–0,2 м<sup>2</sup>·К/кВт, после подогрева – 0,35; 0,25–0,33; 0,4 м<sup>2</sup>·К/кВт. Видно, что произошло увеличение КТС в 2-3 раза вследствие снижения технической плотности контакта из-за распирающих усилий в оболочке. Надежность механического соединения принято характеризовать усилием  $P$  отрыва сектора ребра в 90° от поверхности несущей трубы. Усилие отрыва для серийно изготавливаемых БРТ по применяемой технологии составило  $P = 1,47 - 15,8$  Н. Боковые поверхности рифлений гладкие. Поэтому в радиальном направлении ребро удерживается только за счет сил трения, что, как показал опыт, в некоторых случаях при более высоких температурных условиях работы теплообменного аппарата такой контакт недостаточен, то есть теплообменный аппарат с такими трубами имеет ограниченную область применения по температурам рабочей среды.

Для устранения этого недостатка, который в итоге вызовет уменьшение ТКС и увеличение коэффициента теплопередачи, нами было предложено после накатки рифлений вершины их обжечь до образования грибовидной формы, при этом между соседними элементами рифлений возникает полуоткрытый карман, в который при навивке алюминиевой ленты в спираль произойдет его заполнение пластичным материалом полки ребра за счет его обжатия до величины  $\delta_2 = (0,2 - 0,5) \delta_1$ .

Вершины рифлений обжимаются гладкими роликами, установленными жестко на одной оси с накатными роликами и они расположены за ними по ходу движения.

С целью выбора эффективной формы поперечного сечения рифлений для достижения наибольшей величины отрывного усилия  $P$  был изготовлен на токарном станке ряд рифлений на стальной несущей трубе (рис. 1) с последующим оребрением L-лентой и проведены опыты на вырыв сектора. Вершины рифлений после оребрения прикатывались роликом.

На рис. 1а изображены прямые рифления треугольного профиля с шагом  $S_H=1$  мм, на рис. 1б даны прямые, то есть вдоль образующей трубы, рифления прямоугольного поперечного сечения с шагом 1,0 и 1,5 мм, а на рис. 1в изображена ромбовидная (сетчатая) накатка с шагом 1,2 и 1,5 мм. Косая треугольная накатка (рис. 1г) с шагом 1,2 и 1,5 мм (правая) и такая же накатка, но левая с шагом 1,2 мм (рис. 1д) являются отдельными элементами шевронных рифлений, запатентованных нами [5]. Угол зубьев накатного ролика составлял 70–90°.

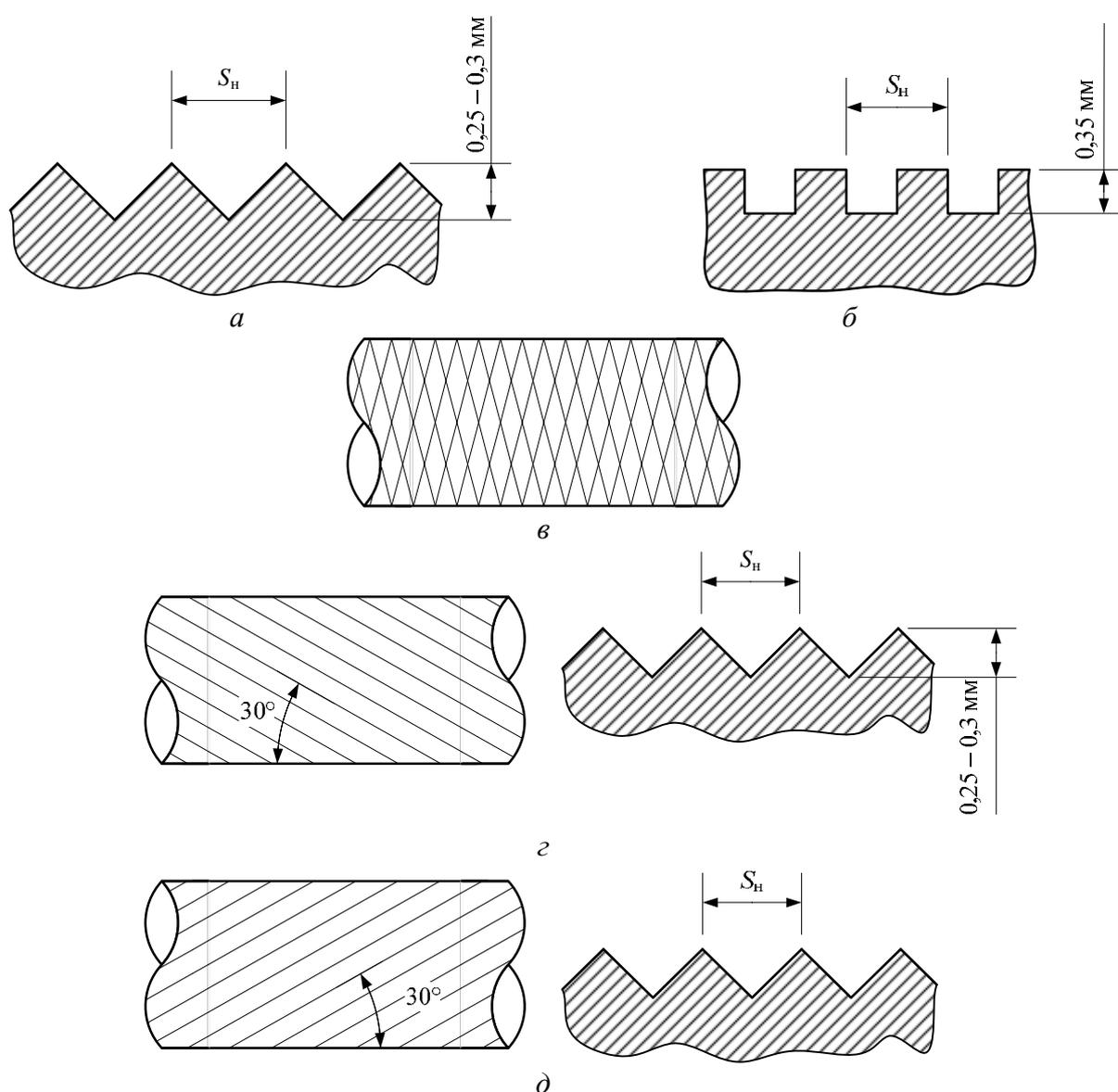


Рис. 1. Форма поперечного сечения рифлений на несущей трубе: а – прямые рифления треугольного профиля; б – прямые рифления прямоугольного поперечного сечения; в – ромбовидная (сетчатая) накатка; г – косая треугольная накатка (правая); д – косая треугольная накатка (левая)

Наилучшие результаты проявили себя БРТ с KLM-ребрами по рис. 1 (*a, б, г* с шагом 1 мм). Вырыв сектора ребра в 90° достиг усилия  $P$  от 70 до 98 Н, что в 6 раз превысило этот показатель для наилучших серийных БРТ такого подкласса.

Вместе с этим при изготовлении рифлений по рисунку 1*в* возникло выкрашивание зубьев стального накатного ролика. Ромбовидная накатка на дала желаемого результата вследствие того, что на вершинах ромбов при обжатии гладкими роликам не образовывались "шляпки"-козырьки или образовывались незначительно. В настоящее время выполняются исследования по совершенствованию технологического процесса изготовления таких БРТ.

Кафедрой энергосбережения, гидравлики и теплотехники БГТУ разработан ряд новых конструкторских решений, защищенных патентами №№ 4814, 5457 Республики Беларусь по микрорельефам (форма сечения и геометрические параметры) контактной зоны, увеличивающие механическое сцепление полки KLM-ребра с несущей трубой и интенсифицирующих тепловую проводимость контакта на 40–50%.

### Обозначения

$R_k$  – контактное термическое сопротивление,  $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ ;  $\alpha_k$  – теплопроводимость контакта,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $\Delta t_k$  – перепад температуры на механическом контакте внутренней поверхности горизонтальной полки алюминиевого L-ребра и наружной поверхности несущей стальной трубы, °С;  $q_k$  – плотность теплового потока в контактной зоне,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $d_k, d_n$  – диаметр зоны контактирования и наружный диаметр несущей трубы соответственно, мм;  $d_1$  – внутренний диаметр несущей трубы, мм;  $d_0$  – диаметр ребра по его основанию, мм;  $h$  – высота ребра, мм;  $\Delta$  – средняя толщина ребра, мм;  $\varphi$  – коэффициент оребрения трубы;  $\psi$  – коэффициент увеличения площади поверхности;  $w_2$  – скорость воздуха в сжатом сечении шахматного пучка, м/с;  $\alpha_2$  – приведенный коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи с внутренней стороны трубы в АВО,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $k$  – коэффициент теплопередачи БРТ,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $R_\Sigma$  – сопротивление теплопередаче БРТ,  $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ ;  $R_1, R_{ст}, R_{зк}, R_{ал}, R_2$  – соответственно термические сопротивления жидкости, стальной стенки, зоны контакта при нормированном значении КТС равном  $R_k=0,2\cdot 10^{-3} \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ , алюминиевой полки ребра, воздуха,  $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ ;  $\alpha_2^{\text{КТС}}$  – коэффициент теплоотдачи с учетом тепловой проводимости контакта,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $R_{зк}$  – приведенное сопротивление зоны контакта,  $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ ;  $m$  – коэффициент, учитывающий увеличение площади поверхности контакта рифлений;  $S_n$  – шаг рифления по окружности несущей трубы, мм;  $d$  – наружный диаметр ребра, мм;  $h_n$  – глубина канавки, мм;  $t_k$  – температура контактной зоны, °С;  $s$  – шаг ребра, мм;  $P$  – усилие отрыва, Н;  $\delta_1, \delta_2$  – исходная толщина полки L-образной ленты и ее толщина после обжатия соответственно, мм.

### Литература

1. Кунтыш В.Б, Пиир А.Э. Анализ тепловой эффективности, объемной и массовой характеристик теплообменных секций аппаратов воздушного охлаждения // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2009. № 5. С. 3–6.
2. Кунтыш В.Б, Пиир А.Э., Мулин В.П., Теляев Р.Ф. Теплоотдача и аэродинамическое сопротивление шахматных пучков из круглых труб с подогнутыми спиральными KLM-ребрами // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2003. № 11. С. 10–14.
3. Кунтыш В.Б, Кузнецов Н.М. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения. СПб.: Энергоатомиздат, 1992. 280 с.
4. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: Справочник. Под ред. В.Б. Кунтыша, А.Н. Бессонного. СПб.: Недра, 1996. 512 с.