



*В.Б. Кунтыш, д-р техн. наук, Е.С. Санкович, А.Б. Сухоцкий, канд. техн. наук
(Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь);
В.П. Мулин (ЗАО «Октябрьскхиммаш», Башкортостан, РФ)*

Новые конструкции биметаллических ребристых труб для воздухоохлаждаемых теплообменников

Воздухоохлаждаемые теплообменники — аппараты воздушного охлаждения (АВО) широко применяются в технологических установках нефтеперерабатывающей промышленности; на компрессорных станциях магистральных газопроводов и газоконденсатных месторождений; в установках синтеза аммиака, метанола, хлорирования углеводородов; в холодильных установках для конденсации паров хладагентов.

Важнейший конструктивный элемент АВО — теплообменная секция, состоящая из собранных в шахматный пучок биметаллических ребристых труб (БРТ) круглого поперечного сечения, обтекаемых снаружи перпендикулярным потоком охлаждающего воздуха. Внутри труб движется охлаждаемый технологический продукт. Габариты АВО, его стоимость и технико-экономические показатели зависят от энергетической эффективности БРТ, технологичности их изготовления в серийном производстве, склонности поверхности оребрения к загрязнению и эксплуатационной надежности. Наиболее перспективные направления улучшения энергомассовой и габаритной характеристик — интенсификация конвективного теплообмена по воздушной стороне теплообменной секции и снижение контактного термического сопротивления (КТС) БРТ. В отечественных АВО применяются БРТ двух конструктивных типов: со спирально накатанными алюминиевыми

ребрами и со спиральными навитыми под натягом ребрами из алюминиевой ленты исходной толщины $\delta = 0,4$ мм. При оребрении труб лентой расход алюминия меньше в 1,5–1,8 раза, расход электроэнергии на осуществление технологического процесса уменьшается до 2,3 раза и составляет 0,60–0,65 кВт·ч на 1 м стандартизированной трубы [1, 2], снижается трудоемкость в ~2 раза по сравнению с оребрением трубы поперечно-винтовой накаткой. Тепловая эффективность [3] теплообменной секции АВО из стандартной БРТ с навитыми КЛМ-ребрами и коэффициентом оребрения $\phi = 22$ также превышает на 12 % эту характеристику для БРТ с накатными ребрами и $\phi = 20,4$. Теплоэнергетически оптимальная средняя толщина ребра для труб с ребрами из алюминиевой ленты — $\Delta \approx 0,30$ –0,35 мм. Ребра из ленты очень пластичны, т. е. отличаются меньшей жесткостью и большим значением относительного удлинения, что благоприятно для выбора способа интенсификации теплообмена и его промышленной реализации. Высокопроизводительное оборудование для технологического процесса спирального оребрения несущих труб различного материального исполнения (углеродистые и коррозионностойкие стали, латунь, мельхиор) алюминиевой лентой успешно применяется на ЗАО «Октябрьскхиммаш», при этом скорость оребрения достигает 6–7 м/мин, что не меньше скорости накатывания спиральных алюминиевых ребер на трехвальных станках

ХПРТ методом холодной экструзии [4]. Изготавливаются БРТ [4] со спиральными навитыми ребрами, завальцованными на глубину 0,3–0,5 мм в стенку несущей трубы; с гладкими L-ребрами (наименее дорогостоящие на сегодняшний день); с КЛМ-ребрами, у которых горизонтальная полка спирального ребра механически закатана в искусственные рельефы, предварительно нанесенные на наружной поверхности несущей трубы. Геометрические параметры несущей трубы и ребер: наружный диаметр трубы $d_n = 10$ –40 мм; шаг ребер $s = 2,3$ –10 мм; длина оребряемой трубы 0,5–12 м; высота ребра h может превышать радиус трубы r_n до двух раз, а отношение r_n/B , где B — исходная ширина ленты, лежит в диапазоне $0,5 \leq r_n/B < 1,0$. Особенностью таких БРТ является отсутствие гофров у основания ребра. Указанный диапазон охватывает как параметры БРТ АВО, для которых характерны $d_n = 25$ и 38 мм, а наружный диаметр ребра соответственно $d = 57$ и 70 мм (при этом исходные размеры алюминиевой ленты для КЛМ-ребер $B \cdot \delta = 17 \cdot 0,4$ мм, а для навитых завальцованных — $17,5 \cdot 0,4$ мм), так и параметры теплообменников систем кондиционирования воздуха и воздушного отопления зданий, биметаллических калориферов, холодильных установок, межступенчатых и концевых холодильных компрессоров.

Несмотря на преимущества БРТ с навитыми ребрами как энерго- и ресурсосберегающей поверхности



охлаждения, их применение в АВО не превышает 30 % общего производства БРТ в России для нефтеперерабатывающей и газовой отраслей промышленности. На наш взгляд, сложившаяся ситуация объясняется главным образом недостаточной осведомленностью и традиционностью технического мышления, сформировавшегося в условиях доминирования на рынке БРТ исключительно БРТ с накатанными ребрами по технологии ВНИИметмаш. Сложилось устойчивое мнение о возможности потери тепловой эксплуатационной надежности вследствие возникновения радиального микроразрыва в зоне контакта полки L-ребра с несущей трубой после многих циклов «пуск-останов» аппарата, что приводит к недоохлаждению продукта и снижению расчетной производительности установки по выпуску товарной продукции. Отмечается также недостаточный температурный диапазон по охлаждаемому продукту и большее значение КТС по сравнению с КТС у БРТ с накатанными ребрами. Экспериментальные исследования [5–7] не подтверждают этих опасений. При приблизительно одних и тех же геометрических параметрах ребер значения КТС R_k труб со спиральными алюминиевыми навитыми KLM-ребрами [8] и накатанными [4] приблизительно одинаковые. На наружной поверхности несущей трубы зубчатым роликом [2] были нанесены искусственные рельефы в виде продольных бороздок-выступов глубиной 0,14–0,17 мм с шагом по вершинам 0,6 мм. Горизонтальная полка KLM-ребра механически закатана в указанные рельефы, параметры которых охватывают параметры стандартизированных БРТ. Они надежно эксплуатируются до температуры 270 °С охлаждаемой среды на входе в теплообменную секцию.

На протяжении последних 12 лет разработаны конструкции БРТ с навитыми под натягом алюминиевыми ребрами улучшенных энергетических, тепловых, эксплуатационных характеристик и увеличенным значением верхнего температурного диапазона применимости в АВО технологических процессов нефте- и газопереработки, химических производств, теплоэнергетике. Отли-

чительной особенностью описываемых конструкций БРТ является увязка изготовления с возможностями современного машиностроения, в частности, с промышленной технологией ЗАО «Октябрьскиммаш», которая позволяет дополнять ее новыми конструкторскими узлами для образования интенсифицирующих элементов при сохранении исходной производительности.

Биметаллическая труба с подогнутыми ребрами [9] отличается повышенной до 25 % интенсивностью теплоотдачи по воздушной стороне и пониженной до 22 % материалоемкостью поверхности оребрения, позволяет обеспечить увеличение до 30–35 % аппаратной тепловой мощности и эксплуатационной надежности АВО, а также повышение компактности трубного пучка на 8–15 %. Теплообменная БРТ (рис. 1) состоит из круглой металлической несущей трубы 1 с навитыми однозаходными алюминиевыми KLM-ребрами 2 и 3 разной высоты с диаметром по основанию d_0 . Высокие ребра 2 имеют в плане вид круговых дисков, сегменты которых отогнуты с противоположных сторон несущей трубы 1 по линии хорды 4. Линия хорды находится на расстоянии $0,5d$ от оси трубы. Низкие ребра 3 периодически чередуются с высокими ребрами 2. Диаметр высоких ребер $D = d + 2n \cdot s$, где n — общее целое число заходов ребра; s — шаг ребра. Расстояние между наружными поверхностями подогнутых ребер $H = d + 2\Delta$, где Δ — толщина высоких ребер. Минимальный поперечный шаг труб в теплообменной секции $S_{\min} = H$; при этом в поперечных рядах секции подогнутые ребра смежных

труб расположены вплотную, что обеспечивает течение всего потока охлаждающего воздуха через межреберные каналы 5, таким образом достигаются интенсификация теплоотдачи, дополнительная турбулизация потока отогнутыми ребрами, возрастание коэффициента эффективности низких ребер по сравнению с высокими.

БРТ с подогнутыми ребрами целесообразно применять при модернизации теплообменных секций АВО второго поколения, у которых поперечный шаг $S_1 = 58$ мм, а у изготавливаемых сейчас труб $d = 57$ мм. При закреплении их в решетках с указанным S_1 при эксплуатации неизбежно возникает защемление ребер соседних труб, их выпучивание. Надежная сепарация при значении $S_1 - d = 1$ мм затруднительна, во избежание этих явлений рекомендуется использовать рассматриваемую конструкцию трубы (см. рис. 1).

БРТ с частично гофрированными ребрами (рис. 2) [10] характеризуется интенсифицированной теплоотдачей на 15–25 % по воздушной стороне в сравнении с теплоотдачей трубы с гладкими ребрами и меньшей склонностью к загрязнению. Она состоит из круглой металлической несущей трубы 1 с навитыми под натягом спиральными алюминиевыми ребрами 2 и 3 разной высоты, основания которых завальцованы в стенку несущей трубы. Диаметр ребер по основанию d_0 равен наружному диаметру d_n несущей трубы, ребра однозаходные. Ребра меньшей высоты (диаметр d_1) расположены между ребрами большей высоты (диаметр d). Периферийный кольцевой участок 5

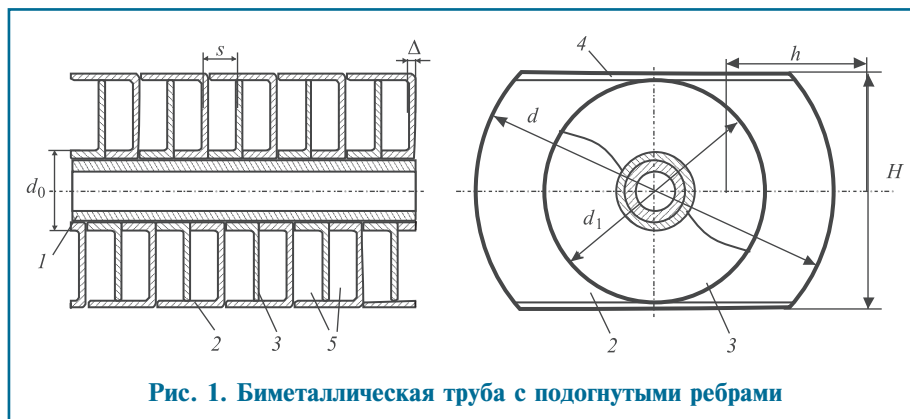


Рис. 1. Биметаллическая труба с подогнутыми ребрами



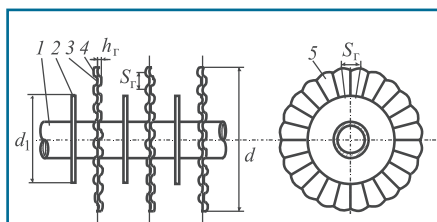


Рис. 2. Биметаллическая труба с кольцевым гофрированным участком ребер большой высоты

шириной $0,5(d - d_1)$ ребер большей высоты выполнен гофрированным. Высота h_r гофров 4 должна быть не меньше толщины δ_c пограничного слоя воздуха на боковой поверхности ребра большой высоты, т. е. $h_r > \delta_c$, а гофры при вершине имеют плавные обтекаемые очертания, что обеспечивает пропорциональный прирост аэродинамического сопротивления. Толщина пограничного слоя воздуха на ребре вычисляется по формуле Блазиуса для ламинарного слоя и формуле Кармана — для турбулентного. Значение шага s_r гофров назначается равным длине присоединения оторвавшихся вихрей от поверхности предыдущего к поверхности следующего гофра, что реализуется в интервале $s_r \approx (8 \div 10) h_r$. Интенсификация теплоотдачи обеспечивается разрушением пограничного слоя воздуха на поверхности ребер гофрами и повышением турбулентности потока в межреберных каналах за счет генерируемых гофрами вихрей.

Другой вариант конструкции — БРТ [11] (рис. 3), состоящая из круглой металлической несущей трубы 1 с навитыми под натягом спиральными алюминиевыми ребрами 2, на одной боковой поверхности которых в чередующемся порядке сформированы зигзагообразные рельефные выступы 3, которые оканчиваются на расстоянии 1–2 мм от вершины ребра, образуя при ней гладкий кольцевой участок шириной $c = (0,06 \div 0,15)h$, где h — высота ребра. Это предотвращает образование надрывов ребра у вершины по его окружности и повышает эксплуатационную надежность. С противоположной стороны рельефные выступы 3 доходят до основания ребра, так как при со-

временных технологиях [1, 4] не препятствуют надежному механическому соединению ребер со стенкой несущей трубы. На кольцевом участке шириной $m = (0,35 \div 0,40)h$ боковой поверхности ребер рельефные выступы расположены радиально, каждый из которых вне этого кольцевого участка отклоняется от радиального направления на одинаковый угол β , образуя на оставшейся боковой поверхности веерообразные рельефные выступы (зигзагообразный рельеф). Высота h_r поперечного сечения радиальных выступов равномерно уменьшается от наибольшей h'_p у основания ребра до высоты h'_b в сечении перехода их в веерообразные выступы, которая сохраняется по всей их длине. У труб с относительной высотой межреберной полости $h/(s - \Delta)$ высота поперечного сечения выступов назначается одинаковой и большей толщины пограничного слоя δ_c воздуха. Шаг радиальных выступов у основания ребра $s'_1 = 8h'_p$, и в этом случае для применяемых параметров ребер шаг веерообразных выступов при вершине будет находиться в окрестности оптимального значения $s'_2 \approx 15h'_b$. Поток воздуха обтекает трубу снаружи перпендикулярно продольной оси. У БРТ АВО спиральные ребра навиваются из алюминиевой ленты А1 толщиной $\delta = 0,4$ мм, вследствие

чего формируется слабовыраженный трапециевидальный профиль ребра со средней толщиной $\Delta = 0,30 - 0,35$ мм, шаг ребер $s \geq 2,3$ мм, высота $h \leq 16$ мм. Интенсификация теплоотдачи достигается разрушением пограничного слоя воздуха на поверхности ребер и повышением пристенной турбулентности вследствие образующихся за выступами вихрей. Тепловая эффективность БРТ возрастает на 10 %.

Одно из направлений интенсификации контактного теплообмена — увеличение (развитие) площади механического контакта между соприкасающимися поверхностями несущей трубы и ребер, в результате чего уменьшается КТС. В серийных БРТ АВО с КЛМ-ребрами, у которых на наружной поверхности трубы созданы искусственные рельефы вида «бороздка-выступ» глубиной и шириной 0,2–0,3 мм по продольным и концентрическим образующим трубы с шагом 1–2 мм, увеличение площади поверхности не превышает 1,5 раза по сравнению с этой характеристикой для навитых алюминиевых L-ребер с гладким основанием контактных поверхностей. Дальнейшее развитие площади контакта ограничено теплоэнергетически целесообразными значениями высоты и шага рельефов. Необходимы новые технические решения в зоне соединения L-полки ребра с несущей тру-

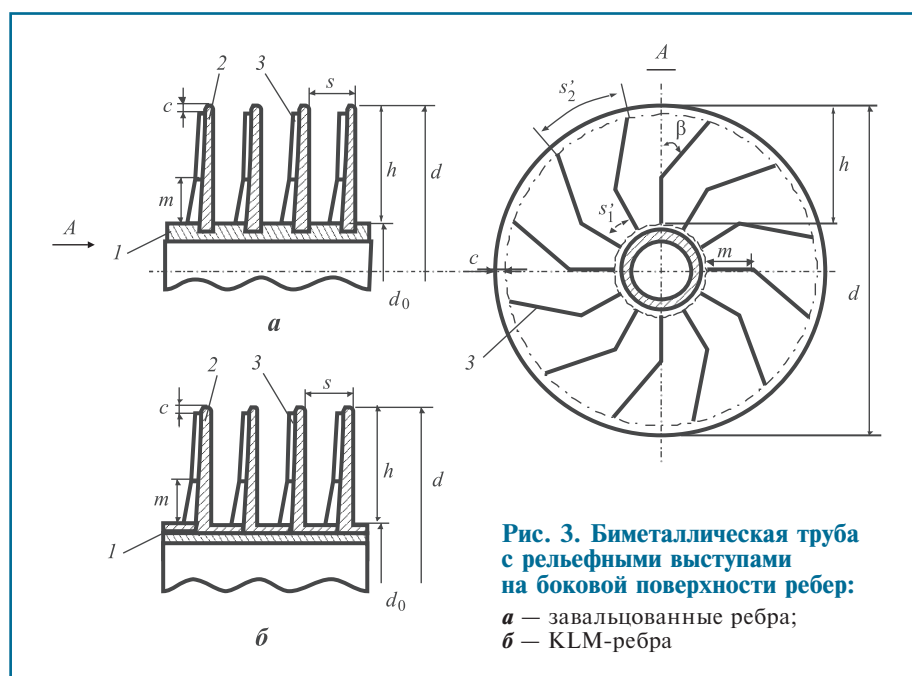


Рис. 3. Биметаллическая труба с рельефными выступами на боковой поверхности ребер:

а — завальцованные ребра;
б — КЛМ-ребра





бой, что реализовано в нижеследующих конструкциях.

Известна БРТ [12] (рис. 4), включающая металлическую несущую трубу 1 круглого поперечного сечения с нанесенными на ее поверхности косыми V-образными рельефами «бороздка-выступ» шевронного типа 2 с углом $\beta = 100-160^\circ$ при вершине и спирально навитые под натяжением однозаходные KLM-ребра 3 из алюминиевой ленты. Горизонтальная полка ребер закатывается в шевронные рельефы. Применение шевронных рифлений увеличивает площадь контактной поверхности до 21 % в сравнении с продольными рифлениями, возрастает контактное давление, обеспечивая увеличение КТС в 1,3–1,4 раза. Расширяется температурный диапазон применимости таких труб до 275–290 °С, сводится до минимума риск раскручивания (отсоединения) спирального ребра от стенки несущей трубы под действием циклического теплового потока в режиме «пуск-останов» АВО. При однозаходном оребрении горизонтальная полка 4 ребра должна занимать всю ширину b шевронного рифления, которая выбирается

равной шагу s . Устраняется осевое перемещение ребра, что исключает появление воздушных микрозазоров в контактной зоне, при этом повышается тепловая надежность. При двухзаходном оребрении полка 4 располагается на половине ширины b шевронного рифления, которая принимается равной $2s$.

БРТ с пирамидальными рельефами [13] с однозаходными спиральными навитыми под натягом KLM-ребрами (рис. 5) состоит из круглой металлической несущей трубы 1 с нанесенными на ее наружной поверхности механическим или иным способом рельефами 2 в виде остроконечных четырехугольных пирамид с углом $\beta = 60-90^\circ$ взаимного пересечения их рядов. После механического соединения полки 4 L-ребра с рельефами 2 получается KLM-ребро 3. Шаг рельефов s_p целесообразно выбрать в интервале 0,8–1 мм, а высоту пирамид меньше толщины полки ребра. Площадь поверхности контакта возрастает до 2,1 раза, интенсификация теплопередачи достигает 6–10 %, предельная температура стенки несущей трубы в контактной зоне достигает 300° при сохранении исходного те-

плового потока, передаваемого трубой при температуре 275°. Полка ребра как будто проколота множеством игл в виде вершин пирамид, образуя прочно-плотный контакт.

БРТ с обжатými вершинами рельефов [14] (рис. 6) включает металлическую круглую несущую трубу 1 с механически нанесенными рельефами «бороздка-выступ» на ее наружной поверхности по продольным и концентрическим образующим с последующим обжатием вершин выступов до образования ими поперечного сечения грибовидной формы 2. Бороздки между такими выступами представляют полуоткрытый карман, который при спиральной (одно- или двухзаходной) навивке алюминиевой ленты под воздействием усилия натяга полностью заполняется металлом горизонтальной полки 3 с образованием KLM-ребра 4. Шаг рельефов $s_p = 1,0-1,2$ мм, а их высота после обжатия $h_p \approx (0,2-0,3) s_p$. Возросшая площадь поверхности контакта обеспечивает уменьшение КТС на 25–35 % и возрастание коэффициента теплопередачи трубы. Внутренняя плоскость грибовидных рельефов удерживает горизонталь-

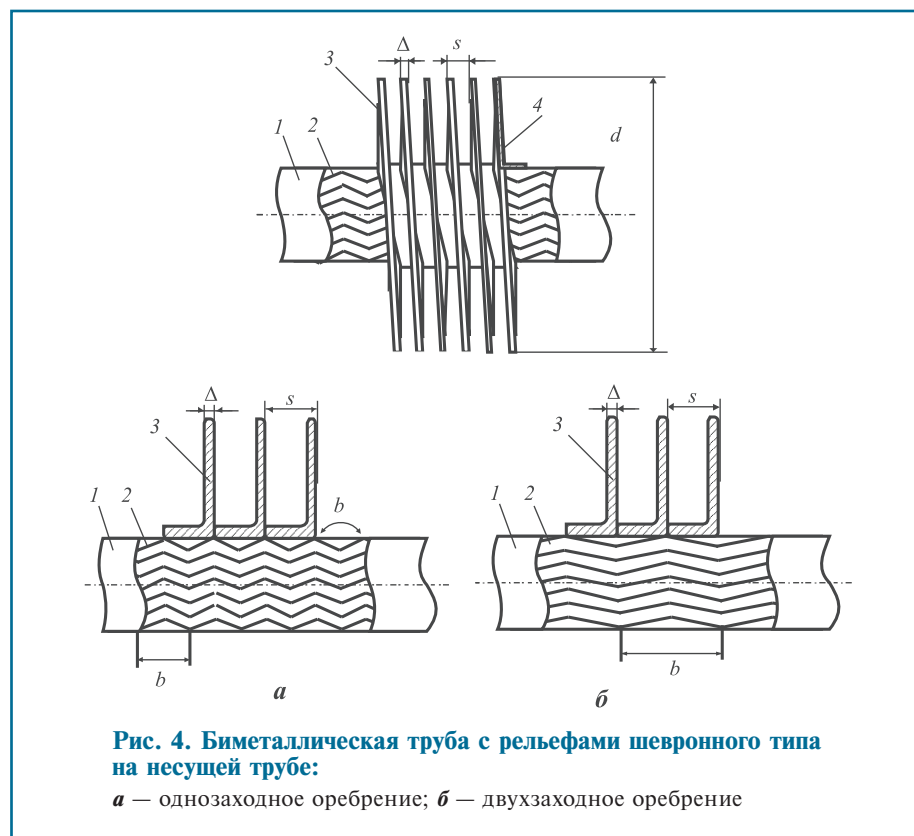


Рис. 4. Биметаллическая труба с рельефами шевронного типа на несущей трубе:

a — однозаходное оребрение; *б* — двухзаходное оребрение

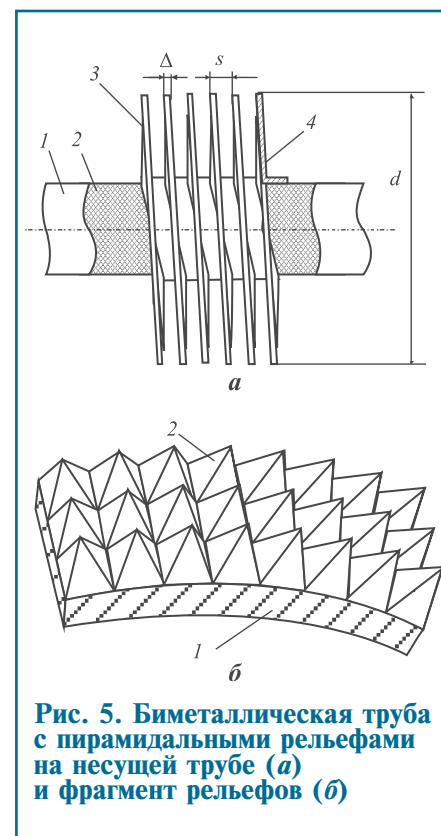


Рис. 5. Биметаллическая труба с пирамидальными рельефами на несущей трубе (а) и фрагмент рельефов (б)



ную полку KLM-ребра от радиального смещения при температуре в контактной зоне до 310 °С, в карманах не наблюдается микроотрывов полки KLM-ребра, поддерживается стабильный механический контакт. БРТ приведенной конструкции может надежно эксплуатироваться в АВО при температуре охлаждаемой среды на входе в нее до 320 °С.

Биметаллическая труба с «олуненной» боковой поверхностью ребер [15] (рис. 7) содержит металлическую трубу 1 круглого сечения со спирально навитыми под натягом алюминиевыми KLM-ребрами 2. В пределах кольцевого участка шириной m на одной боковой поверхности каждого ребра расположены сферические выемки 3 диаметром d_c . Глубина выемок выполняется такой, чтобы на противоположной боковой поверхности под каждой образовались выступы 4 высотой h_b , превышающей толщину пограничного слоя воздуха на кольцевом участке поверхности ребра. Величина плотности выемок на каждом ребре, которая определяет их количество, $\gamma = 55\text{--}65\%$. Ширина кольцевого участка $m = 0,5h$. Для сохранения сферической формы выемок на спиральном натяжном ребре необходимо располагать их на нейтральной линии и в окрестности её на одинаковом расстоянии по одну и другую сторону на участке шириной m . Радиус нейтральной линии ребра $r' = (r \cdot r_0)^{0,5}$, где $r = 0,5d$; $r_0 = 0,5d_0$ — радиус ребра по его основанию. Углубления выступают в роли генераторов вихревых образований, разрушающих, обновляющих и турбулизирующих пограничный слой. Теплоотдача оребренной поверхности БРТ увеличивается до



Рис. 6. Биметаллическая труба с обжатыми вершинами рельефов на несущей трубе

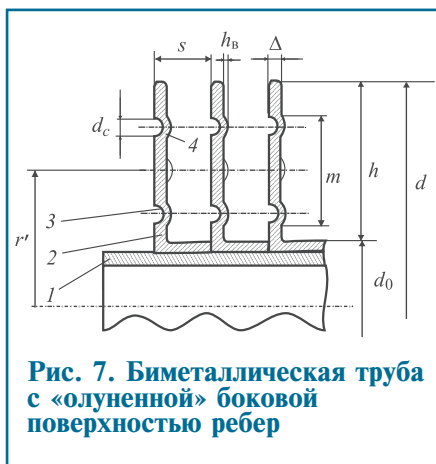


Рис. 7. Биметаллическая труба с «олуненной» боковой поверхностью ребер

1,6 раза при поперечном обтекании её воздухом. Для БРТ АВО с $\phi \approx 22$ можно рекомендовать значения: $m = 8$ мм, $d_c = 3$ мм, общее количество углублений — 80 шт. Разработан технологический процесс изготовления таких труб [16].

Таким образом, приведенные конструкции БРТ характеризуются интенсивной теплопередачей; расширенным температурным диапазоном применимости; повышенной эксплуатационной надежностью; технологичностью в серийном производстве; обеспечивают энерго- и ресурсосбережение при конструировании трубных пучков АВО.

В конструкциях БРТ заложены практически реализуемые способы интенсификации теплообмена, что является залогом успешного освоения производства их заводами — изготовителями теплообменной аппаратуры.

Список литературы

1. Мулин В.П., Черников Н.И. Новый технологический процесс и оборудование для оребрения труб лентой // Кузнечно-штамповочное производство. 1985. № 12. С. 20.
2. Кунтыш В.Б., Пиир А.Э., Мулин В.П. и др. 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., Пиир А.Э. Анализ тепловой эффективности, объемной и массовой характеристик теплообменных секций аппаратов воздушного охлаждения // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2009. № 5. С. 3–6.
4. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: Справочник / под общ. ред. В.Б. Кунтыша, А.Н. Бессонного. СПб.: Недра, 1996. 512 с.

5. Пиир А.Э., Аникин А.И., Кунтыш В.Б. Влияние коррозионно-температурных условий окружающей среды на теплопередачу труб с ленточными ребрами // Проблемы экономики топливно-энергет. ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: межвуз. сб. науч. тр. / СПб ГТУ РП. СПб., 1999. С. 56–63.
6. Пиир А.Э., Рошин С.П., Верещагин А.Ю. и др. Влияние многократных высокотемпературных циклов на термическое контактное сопротивление биметаллических ребристых труб // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2007. № 9. С. 12–13.
7. Пиир А.Э., Верещагин А.Ю., Миннигалиев А.Ш. и др. Влияние многократных высокотемпературных циклов нагрева до 300 °С — охлаждения на ТКС в БРТ с ленточным и накатным оребрением // Материалы III-ей Междунар. науч.-тех. конф. «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (СПб., 13–15 ноября 2007 г.). СПб ГУНТ. 2007. С. 55–61.
8. Кунтыш В.Б., Пиир А.Э. Контактный теплообмен в биметаллических трубах со спирально-навитыми алюминиевыми ребрами L-образного поперечного сечения // Труды XIII-ой Школы-семинара молодых ученых и специалистов под рук. акад. РАН А.И. Леонтьева «Физ. основы эксперимент. и мат. моделирования процессов газодинамики и теплообмена в энергет. установках». (СПб., 20–25 мая 2001 г.). 2001. Т. 2. С. 329–332.
9. Пат. 2213920 С2 РФ, МПК F 28 D 3/02. Теплообменная секция / В.П. Мулин, В.И. Кочетов, Р.Ф. Теляев и др.
10. Пат. 2838 Республика Беларусь (РБ), МПК F 28 F 1/00. Теплообменная труба / В.Б. Кунтыш, Е.С. Санкович, В.П. Мулин и др.
11. Пат. 5047 РБ, МПК F28 F 1/00. Теплообменная труба / В.Б. Кунтыш, Е.С. Санкович, В.П. Мулин и др.
12. Пат. 4814 РБ, МПК F 28 F 1/00, F 25 D 7/00. Теплообменная ребристая труба / В.Б. Кунтыш, В.И. Володин, Е.С. Санкович и др.
13. Пат. 14907 РБ, МПК F 28 F 1/00, F 25 D 7/00. Теплообменная биметаллическая ребристая труба / В.Б. Кунтыш, Е.С. Санкович, В.П. Мулин и др.
14. Положит. решение от 13.03.2012 г. по заявке № а2010036 на выдачу пат. РБ, МПК В 21 С 37/15, F 28 F 1/00. Способ и устройство для изготовления теплообменной трубы с KLM-ребрами / В.Б. Кунтыш, В.П. Мулин, Е.С. Санкович и др.
15. Положит. решение от 04.01.2012 г. по заявке № и2011859 на выдачу пат. РБ, МПК F 28 F 1/00. Теплообменная труба / В.Б. Кунтыш, Е.С. Санкович, В.П. Мулин и др.
16. Заявка № и20120381 от 05.04.2012 г. на выдачу пат. РБ, МПК В21 D 11/06, F 28 F 1/36. Устройство для изготовления теплообменной трубы со спирально-навитыми ребрами / В.Б. Кунтыш, В.П. Мулин, Е.С. Санкович и др.