

В. Б. Кунтыш, д-р техн. наук, профессор; Е. С. Санкович, ст. преподаватель

АНАЛИЗ ПАТЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО КОНТРОЛЮ НАДЕЖНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОЙ РЕБРИСТОЙ ОБОЛОЧКИ С НЕСУЩЕЙ ТРУБОЙ В БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

The analysis of patent radiants under the check of reliability of mechanical linking of an aluminium ribbed shell with a carrier tube in bimetal tubes

Биметаллические ребристые трубы (БРТ) широко применяются в трубных пучках рекуперативных газожидкостных теплообменников энергетической, нефтеперерабатывающей, химической, газовой промышленности, в сушильных, холодильных и теплоутилизационных установках. Типичными представителями этих трубчатых теплообменников являются воздухо- и газоохладители турбо- и гидрогенераторов, воздушные маслоохладители крупных силовых электротрансформаторов, поверхностные теплоутилизаторы для глубокого охлаждения продуктов сгорания природного газа, калориферы и

воздухонагреватели, теплообменные секции аппаратов воздушного охлаждения (АВО) газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов, установок для разделения нефти на составляющие компоненты, теплотрубные утилизаторы тепла систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Затруднительно указать отрасль промышленности и техники, в которых не эксплуатируются теплообменники из БРТ.

Конструктивно БРТ подразделяются на два типа. В первом на несущую трубу накатывается ребристая оболочка из алюминия со спиральными ребрами (рис. 1, а).

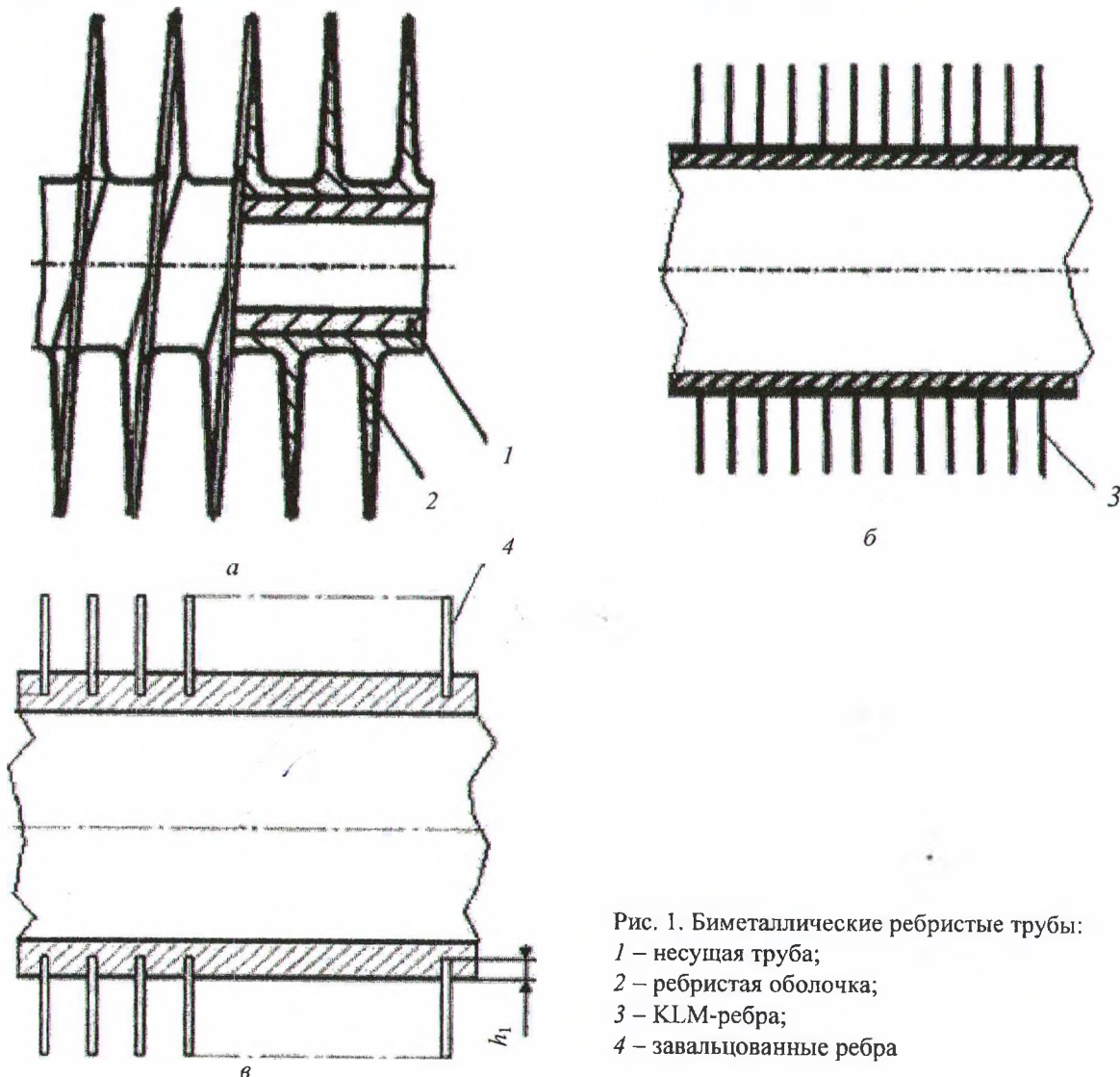


Рис. 1. Биметаллические ребристые трубы:

- 1 – несущая труба;
- 2 – ребристая оболочка;
- 3 – KLM-ребра;
- 4 – завальцованные ребра

Во втором оробрение несущей трубы осуществляется навивкой под натяжением алюминиевой ленты, поставленной на ребро. Основание ленты отгибается горизонтально с образованием L-образного поперечного сечения. Горизонтальная полка ленты механически закатывается в предварительно нанесенные продольно-радиальные бороздки-выступы на наружной поверхности стенки несущей трубы, в итоге образуются KLM-ребра (рис. 1, б). Возможно основание ленты завальцовывать в спиральную канавку небольшой глубины ($h_1 = 0,3-0,5$ мм) в стенке несущей трубы (рис. 1, в). У всех типов теплообменных БРТ отсутствует гомогенная (металлургическая) связь ребер с несущей трубой.

При передаче теплового потока Q вследствие отсутствия гомогенного соединения ребер с поверхностью несущей трубы в зоне механического соприкосновения, а оно характеризуется дискретным характером, возникает температурный перепад и появляется дополнительное термическое сопротивление, называемое термическим контактным сопротивлением (ТКС) R_k , $m^2 \cdot K/Wt$ [1]. Наличие ТКС в БРТ является основным недостатком и в случае некачественного соединения ребер с трубой, не поддающегося визуальному выявлению, может привести к уменьшению отводимого теплового потока аппаратом против проектного и снижению производительности технологической установки по конечному продукту с соответствующей потерей прибыли предприятием. Большие значения ТКС против теплоэнергетически обоснованных [2] обычно возникают в процессе изготовления биметаллических труб при нарушении технологического режима оробрения и не поддаются прямому наружному контролю. Эта проблема возникла одновременно с серийным производством теплообменных БРТ, является актуальной и в настоящее время, так как непосредственно связана с общей проблемой снижения энергопотребления многими энергоемкими технологическими процессами, базовыми для народного хозяйства.

Одним из первых промышленных способов контроля изготовленных теплообменных БРТ, соответствующих стандарту качества [3], был механический способ. Он заключался в измерении усилия P , необходимого для выпрессовки несущей трубы из ребристой оболочки. Выборочно из партии БРТ в количестве 100 шт., подлежащих контролю, отбиралось 5 труб и из них вырезали несколько образцов длиной 100 мм, далее их поочередно помещали в пресс и определяли начальное усилие выпрессовки несущей трубы. При хорошем качестве изготовления оно должно быть $P \geq 10\ 000$ Н. В случае если усилие выпрессовки хотя бы

в одном образце было менее указанной величины, партия труб браковалась. Основными недостатками способа являлись:

- разрушение целостности БРТ и в случае их хорошего качества становились непригодными для направления на сборку теплообменника вследствие недостаточной длины;

- локальная характеристика качества вместо требуемой интегральной для трубы определенной длины;

- низкая достоверность контроля качества вследствие неучета влияния на величину P таких факторов, как замазляемость и загрязненность зоны контактирования оболочки с несущей трубой, шероховатость контактируемых поверхностей, механические свойства контактируемых материалов (сталь + алюминий, латунь + алюминий, медь + алюминий и т. д.), которые способны существенно изменять величину усилия выпрессовки; к этим факторам относится и возможность перекоса пуансона в матрице при выпрессовке, что вызывает многократное увеличение P против истинного;

- невозможность контроля качества БРТ второго типа.

Однако способ применялся заводами-изготовителями БРТ в качестве основного вплоть до середины 1980-х гг. Сложившееся положение объясняется задержкой в разработке новых способов контроля качества БРТ, устранявших очевидные недостатки применяемого.

Последующие работы проводились в направлении поиска и разработки неразрушающих способов контроля качества БРТ на базе прямых тепловых испытаний труб в функциональном режиме промышленной эксплуатации. В [4] предложен способ контроля качества БРТ натурных длин и размеров оробрения, охватывающих все типы изготавливаемых биметаллических труб. Испытания осуществляются при достижении БРТ стационарного теплового состояния. Под этот способ был разработан и внедрен в промышленных условиях стенд [5] (рис. 2) для организации контроля качества БРТ в условиях серийного заводского изготовления. Контролируемая труба 1 или ее часть помещается в теплоизолированный кожух 2 и внутрь трубы подается изотермический теплоноситель, например водяной пар. После этого трубу обдувают поперечным потоком воздуха от вентилятора 3 и при достижении стационарного теплового потока измеряют перепад температур воздушного потока Δt_k , °С, дифференциальной термопарой 4 с регистрирующим прибором 5 и сравнивают с перепадом температур Δt_s , °С, полученным при контроле эталонной трубы идентичных размеров на этом же стенде. По результатам сравнения определяют качество механического соединения оробренной оболочки с несущей трубой. При $\Delta t_k \geq \Delta t_s$ – качество

соединения хорошее, а при $\Delta t_k < \Delta t_s$ – качество соединения неудовлетворительное, труба бракуется.

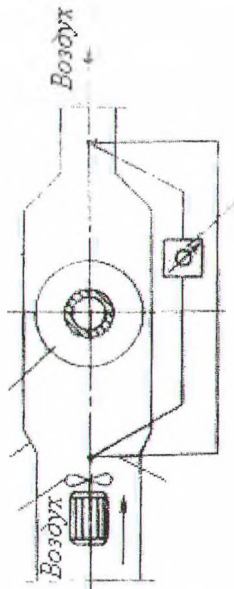


Рис. 2. Поперечный разрез стенда

Способ позволяет получать интегральную характеристику качества механического соединения в БРТ и предотвращать перевод кондиционных труб в бракованные. Данный способ был введен в нормативный документ [3] вместо механического способа и действует в настоящее время в РФ.

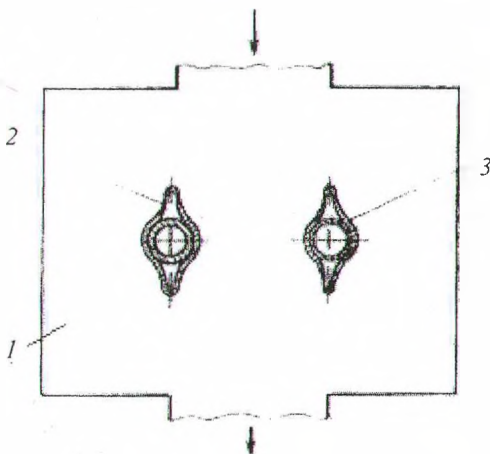


Рис. 3. Поперечный разрез кожуха установки

В разработанном способе [6] (рис. 3) контролируемую трубу 2 и эталонную 3 устанавливают в кожухе 1 вблизи друг от друга и обдувают их снаружи поперечным потоком греющего теплоносителя с постоянными параметрами. Одновременно с этим через БРТ 2 и 3 пропускают охлаждающую воду с одинаковым расходом и температурой.

После достижения БРТ стационарного теплового состояния измеряют перепад температур воды в контролируемой Δt_k , °С, и эталонной Δt_s , °С, трубах и, сравнивая температурные перепады, определяют качество контакта. При $\Delta t_k > \Delta t_s$ – качество механического соединения хорошее. По мнению разработчиков способа, температурный перепад по воде возможно измерить с большей точностью, чем по воздуху [4]. С этим утверждением можно согласиться, а в остальном способ не имеет принципиальных отличий и преимуществ в сравнении со способом [4]. К тому же присущи этим способам общие недостатки, являющиеся следствием выполнения измерений в режиме стационарного теплового состояния трубы: большая длительность контроля качества одной трубы; значительный расход тепловой и электрической энергии, что увеличивает себестоимость изготовленных труб; громоздкость установки, реализующей способ контроля; необходимость наличия на заводе-изготовителе БРТ нескольких испытательных установок, количество которых равно числу типоразмеров изготавливаемых труб по длине.

С целью дальнейшего совершенствования неразрушающих способов контроля БРТ был предложен способ [7], реализующий условия регулярного теплового охлаждения трубы. Способ позволяет снизить энергозатраты на выполнение операции контроля качества. Контролируемую БРТ 1 размещают в корпусе 2 (рис. 4), подают в нее греющий теплоноситель и нагревают трубу до температуры, превышающей на несколько десятков градусов температуру окружающего воздуха.

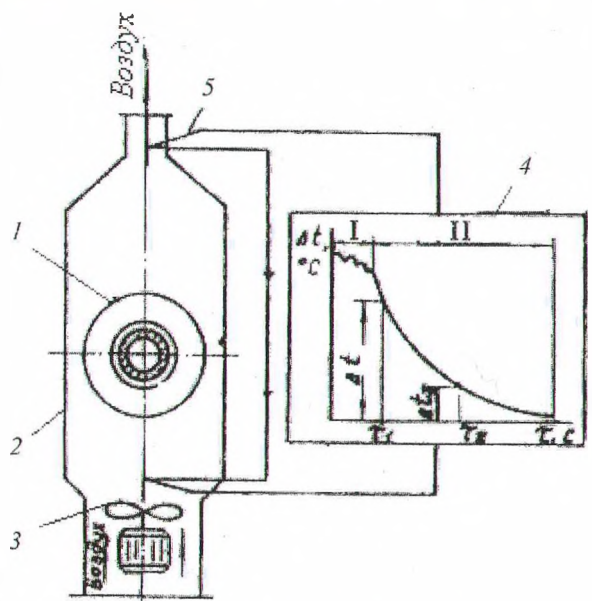


Рис. 4. Поперечный разрез установки

Затем подачу теплоносителя прекращают и обдувают трубу 1 поперечным потоком воздуха с помощью вентилятора 3. Одновременно с

включением вентилятора осуществляют включение самопишущего прибора 4 для записи изменения перепада температур Δt , °С, воздушного потока во времени τ , с, дифференциальной термопарой 5 до полного охлаждения трубы. Полученная кривая изменения $\Delta t = f(\tau)$ адекватна кривой охлаждения контролируемой БРТ. Кривая проходит две стадии охлаждения. Стадия охлаждения I, или неупорядоченный режим, является нерабочей для оценки надежности механического контакта. Стадия охлаждения II является областью регулярного теплового режима и служит для определения темпа охлаждения m_k контролируемой трубы по выражению, °С/с,

$$m_k = (\ln \Delta t_1 - \ln \Delta t_2) / (\tau_2 - \tau_1), \quad (1)$$

где Δt_1 , Δt_2 – температурные перепады воздуха в °С в моменты времени τ_1 , τ_2 , с.

Затем полученное значение m_k сравнивают со значением темпа охлаждения m_s для эталонной БРТ, предварительно испытанной на этом же стенде. Если $m_k \geq m_s$, то труба удовлетворяет требованиям надежности механического соединения контакта, что гарантирует расчетный тепловой поток теплообменника. При невыполнении условия труба бракуется.

Особенность способа – это проведение измерений при нестационарном тепловом режиме, что позволяет снизить теплотребление в 3 раза, а энергопотребление приводом вентилятора до 1,8–2 раза. К сожалению, способ оказался нереализованным в производственных условиях несмотря на очевидные достоинства, в числе которых и небольшая продолжительность рабочей стадии опыта для определения m_k (порядка $\tau = 5\text{--}7$ мин). Основная причина – требуется определенный уровень практической подготовки специалиста для правильного выбора стадии II, иногда не ярко выраженной. И здесь вступает в действие интуиция обработчика испытаний БРТ для вычисления m , т. е. субъективный человеческий фактор. Заключение о качестве трубы может быть неадекватным действительности, ошибка может достигать 10 %.

В патенте [8] РФ для контроля качества механического соединения труб в БРТ также используются условия регулярного теплового режима. Способ контроля реализуется следующим образом. От нагревательного устройства 1 (рис. 5), представляющего вентилятор-калорифер, подают струю горячего воздуха через заслонку 6 на локальный участок длиной 100–200 мм исследуемой биметаллической трубы 5, которая перед началом испытаний имеет температуру окружающей среды. Заслонкой управляют с помощью контроллера 2. Термопару 4 плотно устанавливают в паз между соседними ребрами под углом $\beta = 60\text{--}70^\circ$ к

воздушному потоку и ее положение строго фиксируют от опыта к опыту. Далее персональной ЭВМ 3 задают интервал времени Δt между измерениями температуры t_1 , °С, наружной поверхности ребристой оболочки и общее число измерений. При достижении установившегося теплового режима устройства 1 по команде контроллера 2 автоматически открывается заслонка 6.

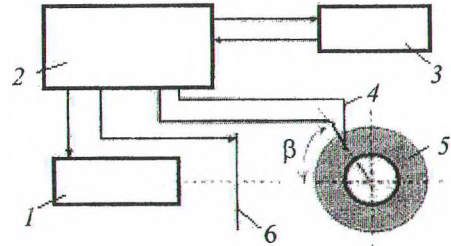


Рис. 5. Принципиальная схема установки

В процессе проведения исследований контроллер снимает аналоговые показания термопары 4 с заданным шагом, преобразует в цифровой код и информацию передает на ЭВМ 3. По истечению заданного числа измерений происходит выключение устройства 1 и закрытие заслонки 6. По экспериментальным данным измерений $t_1(\tau)$ ребристой трубы, используя специализированные программы, вычисляют значение ТКС, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, по формуле

$$R_k = (F_k / C_2)(C_1 / C_2 - 1) | \tau_0 |, \quad (2)$$

где F_k – площадь поверхности контакта, отнесенная к единице длины трубы, $\text{м}^2/\text{м}$; C_1 – теплоемкость ребристой трубы, $\text{Дж}/\text{К}$; C_2 – теплоемкость несущей трубы, $\text{Дж}/\text{К}$; τ_0 – показатель инерционности, совпадающий с временем запаздывания температуры несущей трубы относительно ребристой, с.

Полученные значения ТКС контролируемой трубы сравнивают с допустимыми, полученными на эталонной трубе, и осуществляют отбраковку. Локальный участок трубы нагревают в течение 60–120 с воздушным потоком с температурой 70–80 °С. Контроллер задает шаг измерений не более 0,15 с.

К сожалению, этот способ не устранил недостатки предыдущего [7], а тем более первого способа [1]. Совершенно очевидно, что он не найдет применения в промышленном производстве БРТ по следующим причинам.

1. Контролируется качество механического соединения труб в БРТ лишь локального участка, длина которого во много раз меньше длины промышленной трубы, а полученный результат контроля переносят на полную длину трубы и выносят заключение на отбраковку.

2. Высок элемент случайности в заключении о качестве надежности механического соединения в БРТ, вытекающий из предыдущего недостатка,

также принятием в качестве контролируемого параметра значения R_k , рассчитанного по (2), и сравнения его с нормативно допускаемыми значениями R_k . Согласно (2), значение R_k зависит от полных теплоемкостей C_1 и C_2 , но на их величину влияет химический состав материала несущей трубы и ребристой оболочки, который не является строго стабильным от партии к партии БРТ. Кроме того, C_1 и C_2 зависят от массы труб, величина которой изменяется при изготовлении труб в минусовом или плюсовом допусках их геометрических параметров.

3. Опытная установка, реализующая способ, вследствие пренебрежения растечками тепла в осевом направлении трубы из локального нагревательного участка и ввиду непродолжительности его нагрева, регулярная стадия нагрева процесса будет искажена, а расчетные значения R_k будут иметь пониженную достоверность.

4. При кажущейся внешней простоте и относительно низкой стоимости внедрение способа сопряжено с целым набором ограничительных условий по определению угла установки термонары, направлению струи горячего воздуха, надежности заделки (крепления) термонары к оребренной оболочке и другим, что в производственных условиях сложно выполнить качественно, и кроме того не исключается влияние на результат контроля человеческого фактора.

Электрический способ [9] основан на разнице электропроводности материала несущей трубы и алюминиевой ребристой оболочки. При хорошем механическом соединении оболочка шунтирует несущую трубу, и ее электрическое сопротивление оказывается приблизительно равным электрическому сопротивлению оболочки. Контроль осуществляется следующим образом. Биметаллическую трубу устанавливают на диэлектрических подставках, зажимы соединительных проводов присоединяют к противоположным концам БРТ, причем один зажим соединяют с ребристой оболочкой, другой – с несущей трубой. Выполняют замер электрического сопротивления R_k , Ом, и сравнивают его с величиной электрического сопротивления R_s , Ом, эталонной БРТ идентичных типоразмера и материального исполнения. Если $R_k > R_s$, то испытываемая труба бракуется.

Для повышения достоверности результатов способа контроля измеряют электрическое сопротивление контролируемой трубы, присоединяя на противоположных ее концах щупы измерительного прибора по схеме: ребристая оболочка – ребристая оболочка; ребристая оболочка – несущая труба; несущая труба – несущая труба. При требуемом качестве контакта ребристая оболочка, преимущественно

являющаяся алюминиевой, шунтирует несущую трубу, поэтому сопротивление биметаллической трубы чаще определяют по сопротивлению оболочки. В общем случае надежному механическому контакту отвечает совпадение результатов измерения электросопротивления по указанным трем схемам с расхождением не более 10%. Если величина сопротивления по схеме несущая труба – несущая труба заметно отличается от сопротивления по схеме ребристая оболочка – ребристая оболочка, то качество контакта вызывает опасения.

Способ является исключительно привлекательным для производства из-за простоты в реализации, высокой производительности контроля, низких капитальных затрат. В начале 1980-х гг. данный способ контроля прошел частичные промышленные испытания на Таллинском машиностроительном заводе, которые выявили неполную воспроизводимость результатов измерений, и он рекомендован для доработки. Однако с распадом СССР авторы способа прекратили работы по устранению отмеченных недостатков.

В патенте [10] РБ приведена схема энергосберегающего стенда и испытательного кожуха к нему, устраняющих известные недостатки способа [4]. Предлагаемый кожух, продольный разрез которого показан на рис. 6, выполнен цилиндрическим.

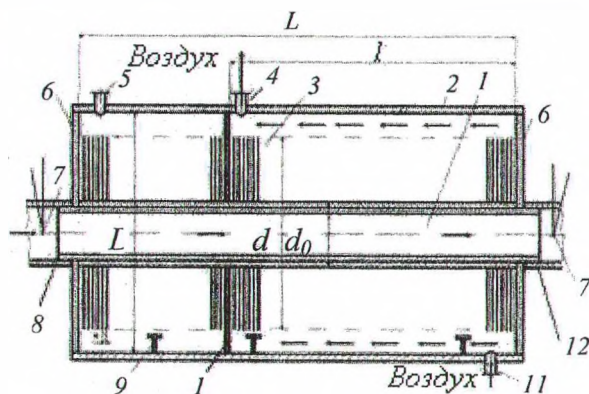


Рис. 6. Продольный разрез цилиндрического кожуха

Воздух движется в кольцевом зазоре $D-d$ кожуха в осевом направлении относительно контролируемой БРТ, а горячая вода с температурой меньше 100°C движется противотоком внутри несущей трубы. Внутренний диаметр кожуха D назначается несколько больше наружного диаметра d ребер трубы. Предлагаемый патент позволяет снизить потребление электрической энергии на проведение контроля одной БРТ длиной $L = 6$ м с коэффициентом оребрения $\phi = 20,4$ в сравнении с применяемым стендом [5] в 2,7 раза, а тепловой – в 9 раз. Кожух позволяет

осуществлять контроль надежности БРТ полной длины L или ее части l . Длина кожуха выбирается равной длине L БРТ, которая является наибольшей из длин труб, подлежащих контролю на данном конкретном предприятии. При контроле оребренной части 3 длиной l неотделимой от БРТ 1, кожух 2 на расстоянии $L-l$ секционируют теплоизолирующим кольцевым диском 10, закрывают выходной воздушный патрубок 5 и открывают патрубок 4. Кожух имеет теплоизолирующие торцы 6. Через входной патрубок 11 подаются воздушный поток. По патрубку 8 внутрь трубы подводится горячая вода, которая выводится через патрубок 12. Для предотвращения прогиба БРТ она устанавливается на промежуточных опорах 9. Дифференциальной термопарой 7 измеряют температурный перепад $\Delta t_{1к}$, °С, воды на контролируемой трубе и сравнивают с температурным перепадом $\Delta t_{1э}$, °С, эталонной БРТ. При $\Delta t_{1к} > \Delta t_{1э}$ качество механического соединения труб хорошее, а при $\Delta t_{1к} < \Delta t_{1э}$ труба бракуется.

Толщина диска δ назначается не большей межреберного расстояния $u = s - \Delta$ трубы, где s – шаг ребер, Δ – толщина ребра. Внутренний диаметр диска равен наружному диаметру ребристой оболочки d_0 у основания ребер.

Из приведенного патентного анализа следует, что число известных способов контроля качества БРТ весьма ограничено, причем на заводах-изготовителях получили применение только два способа: косвенный разрушающий способ «выпрессовки» и стационарный неразрушающий тепловой способ.

Среди двух реально использовавшихся способов контроля качества механического соединения в БРТ наименее физически обоснован способ выпрессовки несущей трубы из ребристой оболочки. Этот способ следует признать полностью не конкурентным, несмотря на попытки отдельных заводов и фирм возродить его использование. Он не обеспечивает неразрушающего контроля изготовленных труб, а также надежность способа оказалась очень низкой.

Тепловые способы, включая и способы, основанные на регулярном тепловом режиме, не могут в полной мере удовлетворить требованиям заводов-изготовителей.

Нам представляется перспективным дальнейшее совершенствование электрического способа, который испытывался на Таллинском машиностроительном заводе и в целом получил положительные отзывы. Были сформулированы условия для его доработки, но изменение форм собственности заводов-изготовителей БРТ не способствовало в течение более 10 лет иницированию исследований по совершенствованию способов контроля качества, в том числе и электрического способа.

1. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: справ. / А. Н. Бессонный [и др.]; под общ. ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессонного. – СПб.: Недра, 1996. – 512 с.

2. Кунтыш, В. Б. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения / В. Б. Кунтыш, Н. М. Кузнецов. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 280 с.

3. ОСТ – 26 – 02 – 1309 – 87. Аппараты воздушного охлаждения. Общие технические условия. – Минхиммаш СССР, 1987. – 16 с.

4. А. с. 1236298 СССР, МКИ F 28 D 1/00, G 01 K 17/08. Способ контроля качества механического соединения оребренной оболочки с несущей трубой в биметаллической трубе / Г. А. Марголин, В. Б. Кунтыш, В. И. Мелехов, К. А. Варма, Т. А. Тальвинг (СССР). – № 3828250/22-02; заявл. 12.12.84; опубл. 07.06.86 // Бюл. № 21. – 4 с.

5. Стенд для контроля качества контакта в биметаллических оребренных трубах / В. Б. Кунтыш [др.] // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1988. – № 12. – С. 7–9.

6. А. с. 1453145 СССР, МКИ F 28 D 1/00. Способ контроля качества соединения оболочки с несущей трубой в двухслойной трубе / Э. Д. Егоров, А. А. Дашчян, В. Д. Симонов, М. И. Некрасов, В. Ю. Пикус (СССР). – № 4259402/24-06; заявл. 09.06.87; опубл. 23.01.89 // Бюл. № 3. – 3 с.

7. А. с. 1601492 СССР, МКИ F 28 D 1/00. Способ контроля качества механического соединения оребренной оболочки с несущей трубой в биметаллической трубе / Г. А. Марголин, В. Б. Кунтыш, В. И. Мелехов, П. И. Потеряев, К. А. Варма, Х. А. Варма (СССР). – № 4621596/24-06; заявл. 25.11.88; опубл. 23.10.90 // Бюл. № 39. – 3 с.

8. Пат. 2211422 Российская Федерация, МКИ F 28 D 1/00, G 01 K 17/08. Способ контроля качества механического соединения оребренной оболочки с несущей трубой в биметаллической трубе / А. Н. Бессонный, Е. А. Бессонный, И. В. Баранов, А. Е. Платунов, Е. С. Платунов; заявитель и патентообладатель – 2002129267/06; заявл. 29.10.02; опубл. 27.08.03 // Бюл. № 24. – 10 с.: ил. 1.

9. Кунтыш, В. Б. Электрический способ контроля качества механического соединения несущей трубы с ребрами в биметаллических трубах / В. Б. Кунтыш, А. Э. Пиир // Информ. листок № 189 – 91, АрхЦНТИ. – Архангельск, 1991. – 4 с.

10. Пат. 3204 Республика Беларусь на полезную модель, МПК⁷ F 28 D 1/00, G 01 K 17/08. Стенд для контроля качества механического соединения ребристой оболочки с несущей трубой в биметаллической трубе / В. Б. Кунтыш, Е. С. Санкович, В. П. Мулин; заявитель и патентообладатель Белорус. гос. технол. ун-т. – № u 20060268; заявл. 27.04.06; опубл. 15.09.06. – 15 с.: ил. 4.