

УДК 536.24

А. А. Андрижиевский, доктор технических наук, профессор (БГТУ);**В. В. Дударев**, кандидат технических наук, доцент (БГТУ);**А. Б. Сухоцкий**, кандидат технических наук, доцент (БГТУ)

ТЕСТИРОВАНИЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РЕБРИСТЫХ ТРУБ ПО ВЕЛИЧИНЕ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО КОНТАКТА НЕСУЩЕЙ ТРУБЫ И ОРЕБРЕННОЙ ОБОЛОЧКИ

Представлены результаты экспериментального изучения теплотехнических характеристик биметаллических ребристых труб и зависимости термических сопротивлений в местах сопряжения поверхностей теплообмена от тепловой нагрузки и условий охлаждения.

The results of an experimental study of thermal characteristics of bimetallic finned tubes and dependence of thermal resistances in places of interface of heat exchange surfaces from heat stress and thermal are presented.

Введение. На рынке энергетического оборудования Республики Беларусь имеется широкий спектр теплообменных устройств, отличающихся как назначением, так и конфигурацией теплообменных поверхностей и способами их компоновки.

Одним из способов сокращения производственных издержек и упрощения процедуры продвижения на рынок теплообменных устройств может быть разработка методов расчетного анализа их тепловых и гидродинамических характеристик с использованием промышленных образцов теплообменных поверхностей. Подобные методы позволят значительно сократить весь производственный цикл от проектирования до внедрения.

Постановка задачи исследования. В основу метода анализа теплогидравлических характеристик многослойных поверхностей теплообмена положена процедура анализа реальной конфигурации этих поверхностей и использование ее в качестве базовой при анализе предлагаемых к внедрению конструкций. Одним из ключевых моментов подобного анализа является определение термического сопротивления контактных поверхностей. Данная проблема может быть устранена посредством решения обратных или прямых задач теплообмена на основе многомерных вычислительных аналогов с использованием тестовых испытаний промышленных образцов теплообменных поверхностей или прямых определений термических сопротивлений в специализированных экспериментальных исследованиях.

В нашей работе представлены результаты экспериментального изучения теплотехнических характеристик биметаллических ребристых труб и, в частности, зависимости термических сопротивлений в местах сопряжения поверхностей теплообмена от тепловой нагрузки и условий охлаждения. Эти результаты не только представляют самостоятельный интерес, но и могут быть использованы в качестве исходных данных при решении прямых и обратных задач теплообмена в рамках верификации соответствующих вычислительных аналогов [1].

Описание объекта исследования. Биметаллические ребристые трубы (БРТ), состоящие из гладкой стальной трубы и алюминиевой оболочки из накатных ребер (рис. 1), применяются в теплообменных секциях аппаратов воздушного охлаждения (АВО) топливно-энергетического комплекса, на компрессорных станциях магистральных газопроводов, на нефтеперерабатывающих заводах, также в качестве калориферов, например в системах вентиляции или в конденсаторах холодильных установок.

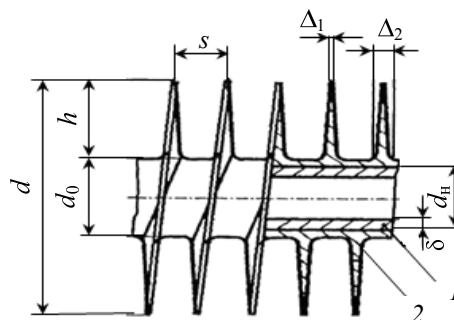


Рис. 1. Биметаллическая ребристая труба:
1 – гладкая стальная труба; 2 – алюминиевая ребристая оболочка; d – наружный диаметр ребра; h , s , $\Delta = 0,5(\Delta_1 + \Delta_2)$ – соответственно высота, шаг и средняя толщина ребра; $d_0 = d - 2h$ – диаметр ребра по его основанию; d_n – наружный диаметр гладкой трубы; δ – толщина гладкой трубы

Сочетание двух конструктивных элементов в БРТ, выполненных из разных материалов с существенно различающимися коэффициентами линейного расширения (у алюминия его значение в 2 раза выше, чем у стали), приводит к ослаблению механического контакта при нагревании БРТ горячим теплоносителем изнутри трубы.

Различие термодформаций несущей трубы и алюминиевой оребренной оболочки приводит в процессе эксплуатации БРТ к увеличению микрополостей, возникающих при накатке алюминиевых ребер, что создает дополнительное термическое контактное сопротивление (ТКС), рассчитываемое по соотношению

$$R_k = \frac{\Delta T_k}{q_k}, \quad (1)$$

где ΔT_k – температурный перепад между поверхностями контакта, К; q_k – плотность теплового потока через зону контакта, Вт/м².

В работе [2] приведен метод расчета натяга между соприкасающимися поверхностями стальной трубы и алюминиевого ребрения. Согласно этой методике, для расчета деформации натяга и контактного давления необходимо знать ТКС, величина которого зависит как от конструктивных параметров БРТ, так и от особенностей технологии накатки ребер.

Тепловые испытания серии БРТ, проведенные в данной работе, показали, что зависимость ТКС от температуры в контакте носит линейный характер. Таким образом, для тестирования БРТ после изготовления, а затем и во время эксплуатации необходим надежный и удобный экспресс-метод определения ТКС. Создание такого метода являлось целью данной работы.

Отработка экспресс-метода определения ТКС осуществлялась на базе четырехрядного шахматного пучка равносторонней компоновки с поперечным и диагональным шагами $s_1 = s'_2 = 33$ мм (рис. 2).

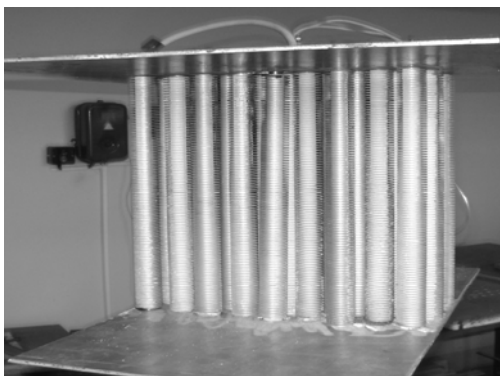


Рис. 2. Опытный трубный пучок из БРТ

Пучок собирался из БРТ следующих параметров (рис. 1): $d = 26$ мм; $h = 5,75$ мм; $s = 2,7$ мм; $\Delta = 0,33$ мм; $d_0 = d - 2h = 14,5$ мм. Наружный диаметр стальной несущей трубы $d_k = 12$ мм, а толщина стенки $\delta_1 = 1,25$ мм. Ребра алюминиевые накатные однозаходные.

Длина рабочего участка каждой трубки пучка составляет 300 мм. Данный тип труб изготавливается промышленным способом и широко применяется на практике.

При сборке пучка, в его первом или третьем ряду, предусмотрена возможность монтажа БРТ-калорифера, представляющего собой пароэлектрический мини-котел. Источником генерируемой калорифером теплоты является электроэнергия. Электрическая мощность, подводимая

к БРТ-калориферу, регулируется реостатом и измеряется электрокомплексом К-505.

Для испытания описанного выше трубного пучка из БРТ использовался экспериментальный стенд по определению аэродинамических и тепловых характеристик пучков биметаллических ребристых труб.

Для измерения температуры в зоне контакта БРТ-калорифера применялись термоэлектрические преобразователи, соединенные с регистрирующим милливольтметром типа В7-35 через низкоомный переключатель.

Методика измерения контактного сопротивления. Графическое пояснение методики определения ТКС по соотношению (1) дает рис. 3.

Входящая в это соотношение величина температурного перепада между поверхностями контакта $\Delta T_k = t_{k1} - t_{k2}$ определялась как разность температур наружной поверхности несущей стальной трубы t_{k1} и внутренней поверхности ребристой алюминиевой оболочки t_{k2} , которые рассчитывались по формулам:

$$\begin{cases} t_{k1} = \frac{t_{ст}^H + t_{ст}^B}{2} - q_k \left(\frac{\delta_{ст} - \delta_3}{\lambda_{ст}} \right), \\ t_{k2} = \frac{t_{ал}^H + t_{ал}^B}{2} + q_k \left(\frac{\delta_{ал} - \delta_3}{\lambda_{ал}} \right), \end{cases}$$

где $t_{ст}^H$, $t_{ст}^B$ и $t_{ал}^H$, $t_{ал}^B$ – соответственно температуры, измеренные четырьмя медь-константановыми термоэлектрическими преобразователями, горячие спаи которых заложены по концам трубы снаружи у основания ребер и на границе контакта основной трубы и алюминиевой оболочки; $\delta_{ст}$, $\delta_{ал}$, δ_3 – толщина несущей стальной трубы и ребристой алюминиевой оболочки, глубина заделки термопар; $\lambda_{ст}$, $\lambda_{ал}$ – теплопроводность стали и алюминия.

Плотность теплового потока в контактной зоне определяли как

$$q_k = \frac{Q}{F_k},$$

где тепловой поток через зону контакта рассчитывается по уравнению теплового баланса:

$$Q = W - Q_{\Sigma\text{пот}},$$

W – электрическая мощность, превращенная в БРТ-калорифере в теплоту:

$$Q_{\Sigma\text{пот}} = Q_{\text{эл}} + Q_{\text{тор}} + Q_{\text{луч}},$$

где $Q_{\Sigma\text{пот}}$ – суммарные тепловые потери; $Q_{\text{эл}}$ – расход энергии на процесс электролиза; $Q_{\text{тор}}$ – потери теплоты на торцах БРТ-калорифера и в гидрозатворе; $Q_{\text{луч}}$ – тепловой поток, отводимый от БРТ-калорифера излучением. Суммарные тепловые потери, определенные в процессе тестирования оборудования, составили $Q_{\Sigma\text{пот}} = 20\%$.

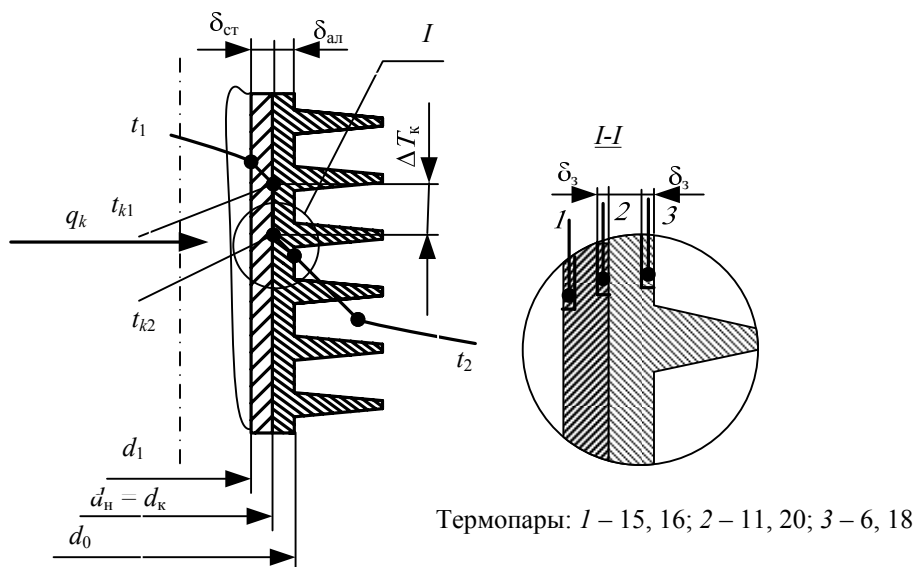


Рис. 3. Схема распределения температуры по сечению биметаллической оребренной трубы:
 t_1 — температура греющего теплоносителя;
 t_2 — температура обтекающего потока газа (воздуха)

Площадь контакта основной трубы и оребренной оболочки для труб исследуемого пучка определялась по формуле $F_k = \pi d_n l_{тр}$ и равнялась $1,13 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$.

Результаты исследования. Тестирование качества контакта несущей трубы и алюминиевой оребренной оболочки (рис. 1, 3) по изложенной методике проводилось при следующем тепловом и аэродинамическом режиме: генерируемое в калориметре количество теплоты варьировалось в диапазоне $Q = 210\text{--}670 \text{ Вт}$; интервал чисел Рейнольдса для воздушного потока составлял $Re \cong 2000\text{--}9000$.

Результаты обобщения экспериментальных исследований представлены на рис. 4. Каждое обозначение точек соответствует своей серии эксперимента.

Как следует из рис. 4, зависимость $R_k = f(\Delta T_k)$ носит линейный характер, т. е. может быть в первом приближении описана уравнением прямой линии.

Для испытанного типоразмера БРТ (рис. 1) данное уравнение имеет вид

$$R_k = 3,2 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta T_k,$$

где ΔT_k — перепад температур в месте контакта.

С учетом полученной зависимости по изложенным в [2] методикам проведен оценочный расчет ряда характеристик:

— толщины эквивалентной воздушной прослойки в месте контакта сопряженных теплообменных поверхностей:

$$\delta_b = R_k \cdot \lambda_b = 3,2 \cdot 10^{-4} \cdot 3,05 \cdot 10^{-2} = 9,8 \text{ мкм},$$

где ТКС соответствует $\Delta T_k = 10^\circ \text{С}$, а теплопроводность воздуха λ_b в прослойке выбиралась по средней температуре контакта $T_k = 80^\circ \text{С}$;

— температурной деформации стальной трубы в зоне контакта:

$$\begin{aligned} \Delta_{ст} &= \alpha_{ст} r_n (T_k - T_{oc}) = \\ &= 12 \cdot 10^{-6} \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot (80 - 19) = 4,4 \text{ мкм}, \end{aligned}$$

где $\alpha_{ст} = 12 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ — коэффициент температурного расширения для стали; $r_n = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ — наружный радиус стальной трубы; $T_{oc} = 19^\circ \text{С}$ — измеренная в ходе эксперимента температура окружающей среды;

— температурной деформации алюминиевой обечайки в зоне контакта:

$$\begin{aligned} \Delta_{ал} &= \alpha_{ал} r_n (T_k - T_{oc}) = \\ &= 22,9 \cdot 10^{-6} \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot (80 - 19) = 8,4 \text{ мкм}; \end{aligned}$$

— температурного зазора из-за разности деформаций стали и алюминия в зоне контакта:

$$\Delta_T = \Delta_{ал} - \Delta_{ст} = 8,4 - 4,4 = 4 \text{ мкм}.$$

Полученные экспериментальные результаты по порядку величины Δ_T согласуются с данными других исследований [2].

Для подтверждения достоверности расчетов в ходе исследования ТКС БРТ, а также возможности построения их вычислительных аналогов снимались профилограммы контактирующих поверхностей из стали и алюминия (рис. 5).

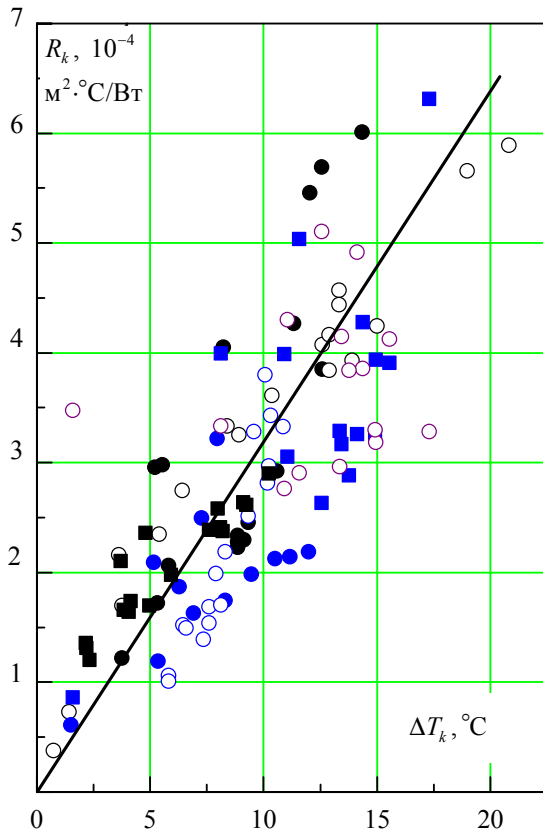


Рис. 4. Экспериментальная зависимость термического контактного сопротивления от величины температурного перепада в контакте (обозначение точек соответствует отдельной серии эксперимента)

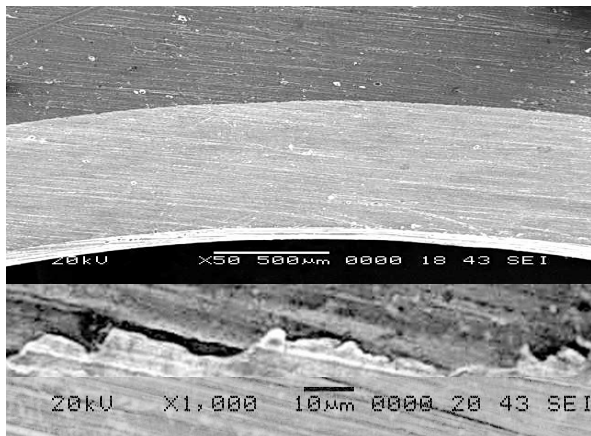


Рис. 5. Электронная фотография контактной поверхности при различных (50- и 1000-кратных) увеличениях

Как видно из рис. 5, контактная поверхность имеет сложную структуру с взаимными проникновениями отдельных слоев и воздушными прослойками с условной толщиной порядка $\delta_b = 5\text{--}10$ мкм.

Приняв $\lambda_b = 2,59 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м²·°С) при 20°С, получим соответствующее данной температуре значение ТКС:

$$R_k = \frac{\delta_b}{\lambda_b} = \frac{10 \cdot 10^{-6}}{2,59 \cdot 10^{-2}} = 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт},$$

которое согласуется с профилограммами контактирующих поверхностей исследованных образцов БРТ.

Закключение. Выполнено экспериментальное изучение теплотехнических характеристик БРТ и, в частности, зависимости термических сопротивлений мест сопряжения поверхностей теплообмена от тепловой нагрузки и условий охлаждения.

Полученные значения контактных сопротивлений, включая и температурные зазоры вследствие разности деформаций стали и алюминия в зоне контакта, согласуются как с данными других авторов, так и профилограммами контактирующих поверхностей исследованных образцов БРТ.

Результаты данного исследования не только представляют самостоятельный интерес, но и могут быть использованы в качестве исходных данных при решении прямых и обратных задач теплообмена в рамках верификации соответствующих вычислительных аналогов.

Литература

1. Андрижиевский, А. А. Разработка и верификация пространственного вычислительного аналога биметаллической контактной поверхности теплообмена / А. А. Андрижиевский, А. П. Вороницкая, А. Г. Лукашевич // Труды БГТУ. – 2012. – № 3: Химия и технология неорг. в-в. – С. 150–153.
2. Кунтыш, В. Б. Термическое контактное сопротивление биметаллической ребристой трубы и метод расчета натяга между соприкасающимися поверхностями / В. Б. Кунтыш, Н. Н. Стенин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 1997. – № 6. – С. 42–45.

Поступила 22.02.2013