

**Щербин Сергей Анатольевич,**

к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,

e-mail: dekan\_ftk@angtu.ru

**Коряченко Антон Олегович,**

магистрант, Ангарский государственный технический университет,

e-mail: koriachenkoanton@mail.ru

## **ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ И ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА**

Shcherbin S.A., Koriachenko A.O.

## **THE INFLUENCE OF THE STRUCTURAL MATERIAL OF HEAT EXCHANGE PIPES AND THE THERMAL RESISTANCE OF CONTAMINATION OF THE HEAT TRANSFER SURFACE ON THE INTENSITY OF HEAT EXCHANGE**

**Аннотация.** Рассматривается влияние конструкционного материала теплообменных труб и термического сопротивления загрязнений теплопередающей поверхности на интенсивность теплообмена. Показана необходимость учета этих факторов при проектировании теплообменных аппаратов.

**Ключевые слова:** теплообмен, коэффициент теплопередачи, теплообменные трубы, термическое сопротивление.

**Abstract.** The influence of the structural material of heat exchange pipes and the thermal resistance of contamination of the heat transfer surface on the intensity of heat exchange is considered. The necessity of taking these factors into account when designing heat exchangers is shown

**Keywords:** heat exchange, heat transfer coefficient, heat exchange pipes, thermal resistance.

Аппараты воздушного охлаждения (АВО) используются на нефтеперерабатывающих, нефтехимических, химических и смежных с ними производствах для конденсации паров и охлаждения высокотемпературных жидких сред. Они получили распространение на пожаро- и взрывоопасных производствах, поскольку существенная доля теплоты в этих аппаратах отводится посредством естественной конвекции атмосферного воздуха, что является существенным фактором при аварийных ситуациях.

Использование атмосферного воздуха в качестве теплоносителя ограничено малой величиной коэффициента теплоотдачи от теплообменной поверхности к воздуху. В АВО, как правило, коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности труб к воздуху значительно меньше коэффициента теплоотдачи от технологической среды к внутренней поверхности труб. Поэтому, для повышения эффективности АВО за счет увеличения коэффициента теплоотдачи к воздуху и площади поверхности теплообмена, наружную поверхность теплообменных труб выполняют ребренной. Соответственно, важной характеристикой трубного пучка АВО является коэффициент ребрения  $K_{ор}$ , рассчитываемый как отношение площадей наружных поверхностей ребренной и неребренной труб.

В публикациях [1-3] рассматривается влияние коэффициента ребрения

теплообменных труб на процесс теплопередачи в АВО, предназначенном для конденсации пропана. В результате был определен оптимальный коэффициент оребрения, при котором теплопередача будет наиболее интенсивной (рисунок 1). Отмечается, что предложенный подход целесообразно применять на стадии проектирования теплообменных аппаратов, поскольку замена трубного пучка вряд ли будет экономически целесообразной – пучки оребренных труб являются наиболее дорогими элементами АВО и их замена потребует больших капитальных затрат, сопоставимых со стоимостью теплообменного аппарата.

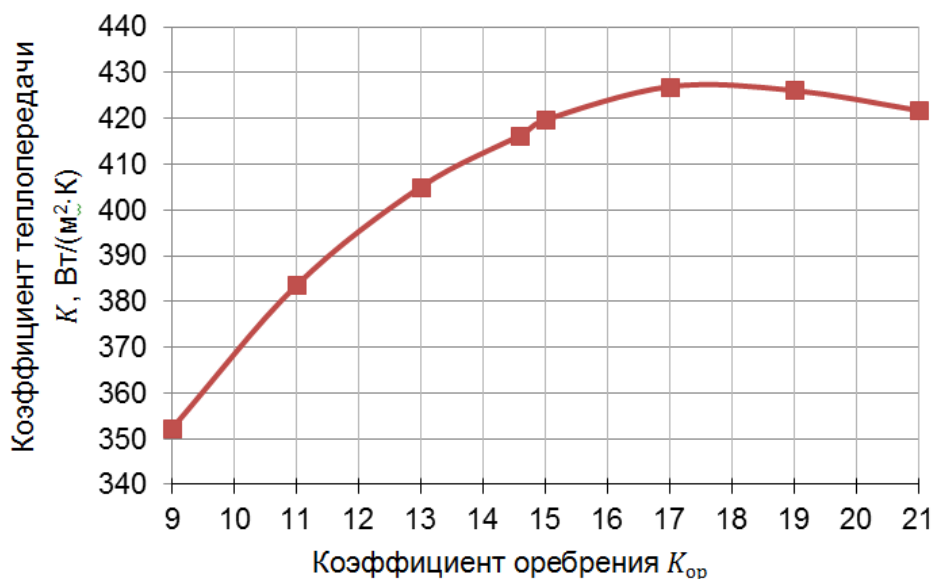


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента теплопередачи  $K$  при конденсации пропана от коэффициента оребрения трубного пучка  $K_{ор}$

Представленные на рисунке 1 значения коэффициентов теплопередачи были рассчитаны для алюминиевых теплообменных труб. На следующем этапе было рассмотрено влияние материального исполнения теплообменных труб и термического сопротивления загрязнений на теплопередающей поверхности на интенсивность теплообмена.

Трубы АВО имеют наружное оребрение и изготавливаются из разных материалов (рисунок 2). Наиболее часто используются алюминиевые трубы с накатанными винтовыми ребрами и биметаллические трубы, состоящие из внутренней гладкой трубы (стальной или латунной) и наружной алюминиевой оребренной трубы.

В случае использования биметаллических теплообменных труб (рисунок 2, б) возникает дополнительное контактное термическое сопротивление в микроскопическом зазоре между внутренней и наружной трубами, заполненном воздухом.

Величину контактного термического сопротивления биметаллической трубы можно приближенно определить, если принять следующие допущения:

- твердые поверхности труб соприкасаются только вершинами профилей

шероховатостей;

– площадь поверхности контакта пренебрежимо мала и весь тепловой поток проходит через воздушный зазор между соприкасающимися слоями;

– толщина зазора  $\delta$  в среднем вдвое меньше максимального расстояния между впадинами шероховатостей  $\delta_{max}$ .

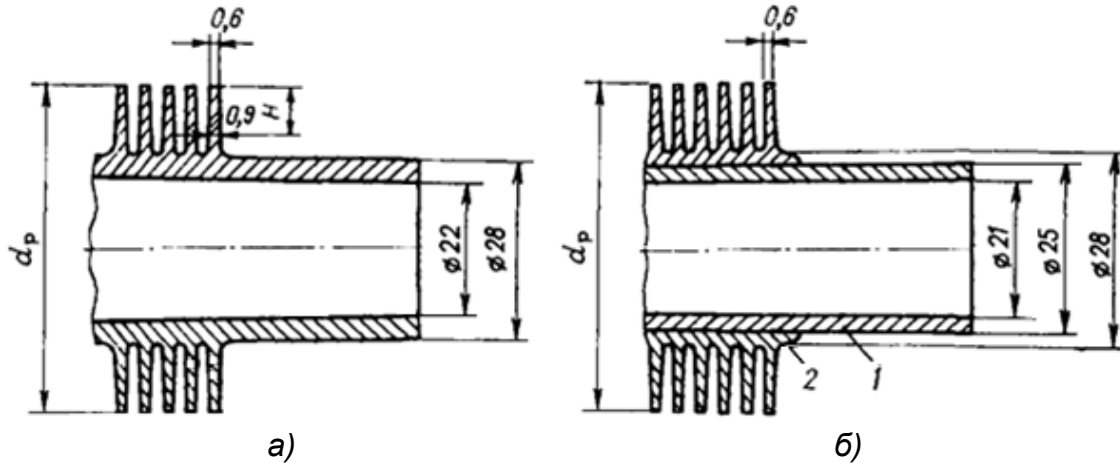


Рисунок 2 – Оребренная теплообменная труба АВО:

а) – монометаллическая (алюминиевая); б) – биметаллическая;

1 – внутренняя стальная труба; 2 – наружная алюминиевая оребренная труба

Например, при контакте новых и гладких труб – стальной бесшовной без покрытия ( $\delta_{max} = 0,1$  мм) и алюминиевой ( $\delta_{max} = 0,06$  мм):

$$\delta = (0,1 + 0,06)/2 = 0,08 \text{ мм} = 0,08 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Принимая коэффициент теплопроводности воздуха  $\lambda = 0,026$  Вт/(м · К), выразим контактное термическое сопротивление биметаллической трубы:

$$R_k = \delta/\lambda = 0,08 \cdot 10^{-3}/0,026 = 3,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт.}$$

Полученное значение  $R_k$  эквивалентно термическому сопротивлению слоя нержавеющей стали ( $\lambda = 17,5$  Вт/(м · К)) толщиной 54 мм или латуни ( $\lambda = 93$  Вт/(м · К)) толщиной 286 мм.

Очевидно, что при изготовлении труб и других изделий из биметалла для уменьшения контактного термического сопротивления следует либо уменьшать шероховатость сопрягаемых поверхностей, что потребует значительных затрат на обработку и приведет к существенному увеличению стоимости оборудования, либо заполнять зазоры между слоями каким-либо материалом с более высоким, чем у воздуха, коэффициентом теплопроводности.

Известно, что теплопередающая поверхность теплообменных аппаратов в процессе эксплуатации, как правило, загрязняется по разным причинам – появляются отложения осадка или накипи на поверхности стенок, формируется корродированный слой металла и т.д. Поэтому актуальной проблемой является выбор правильных значений термических сопротивлений загрязнений  $R_3$ .

В литературе приводятся средние значения  $R_3$  для различных технологических сред, но только ориентировочные и в широком диапазоне, что увеличи-

вает вероятность ошибочного выбора. Для многих сред такие данные вовсе отсутствуют. Так, для пленки конденсата пропана, как для легкого органического вещества,  $0 < R_3 < 10^{-4} \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ . То есть значение может быть выбрано от нулевого, до эквивалентного термическому сопротивлению слоя нержавеющей стали толщиной 2 мм или латуни толщиной 9 мм.

Также следует отметить, что термические сопротивления загрязнений увеличиваются с течением времени, в результате чего интенсивность теплопередачи в аппарате после длительной его эксплуатации может снизиться на 40-50 % по сравнению с аппаратом с чистыми стенками. Например, в работе [4] показано, что термические сопротивления загрязнений в промышленных газовых теплообменниках со временем (20-30 лет эксплуатации) могут достигать значения  $0,005 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$  и выше. Сделан вывод, что годовой прирост термического сопротивления загрязнений в таких теплообменниках, если не проводить их чистку, может составить величину порядка  $0,0002\text{-}0,00025 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ .

Таким образом, перечисленные факторы необходимо учитывать при расчетах и проектировании теплообменного оборудования. В частности, уравнение для расчета коэффициента теплопередачи через пучок оребренных биметаллических труб в наиболее полном виде будет иметь вид:

$$K = [1/\alpha_1 + R_{31} + \delta_1/\lambda_1 + R_k + \delta_2/\lambda_2 + R_{32} + 1/(\alpha_{\text{пр}}K_{\text{оп}})]^{-1},$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от теплоносителя в трубном пространстве к внутренней поверхности труб,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $R_{31}$  и  $R_{32}$  – термические сопротивления загрязнений на внутренней и наружной поверхностях труб,  $(\text{м}^2\cdot\text{К})/\text{Вт}$ ;  $\delta_1$  и  $\delta_2$  – толщины слоев биметалла, м;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности материалов биметаллической стенки,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $\alpha_{\text{пр}}$  – приведенный коэффициент теплоотдачи к воздуху,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Щербин С. А., Коряченко А. О.** Способ повышения эффективности воздушного конденсатора пропана // Тезисы докладов ежегодной международной НТК имени профессора В.Я. Баденикова «Современные технологии и научно-технический прогресс». – 2022. – С. 89-90.
2. **Щербин С. А., Коряченко А. О.** Повышение эффективности теплоотдачи в аппаратах воздушного охлаждения // Тезисы докладов ежегодной международной НТК имени профессора В.Я. Баденикова «Современные технологии и научно-технический прогресс». – 2021. – С. 105-106.
3. **Щербин С. А., Коряченко А. О.** Повышение эффективности теплоотдачи в воздушном конденсаторе пропана // Сборник научных трудов АНГТУ. – 2021. – С. 99-102.
4. **Калашников О. В., Будняк С. В.** Подсистема выбора кожухотрубчатых теплообменников для установок промышленной подготовки природного газа // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2008. – № 5. – С. 69-71.