

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 536.2:519.6

А. А. Андрижиевский¹, А. Г. Лукашевич²

¹Белорусский государственный технологический университет
²Объединенный институт энергетических и ядерных исследований –
Сосны НАН Беларуси

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЧИСТОТЫ ОБРАБОТКИ И УСЛОВИЙ СОПРЯЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕНОСА

В рамках данного исследования рассматривалась проблема влияния чистоты обработки биметаллических контактирующих поверхностей теплообмена на величину термического сопротивления зоны их сопряжения и, соответственно, на теплообменные характеристики биметаллических теплообменных устройств.

В результате проведения комплекса вычислительных экспериментов получен ряд новых результатов и, в частности, зависимости термических сопротивлений зон сопряжения, тепловых потоков и перепадов температур от чистоты обработки контактирующих теплообменных поверхностей и влияния на контактный зазор термических условий.

Выполнено сравнение экспериментальных и численных зависимостей термических сопротивлений от перепада температур в зоне контакта (сравнение выполнено для перепада температур до 20°C, в котором эти зависимости носят линейный характер). Отмечено хорошее согласие расчетных и опытных данных.

По результатам исследования делается общий вывод о заметном влиянии степени шероховатости поверхностей теплообмена на термические параметры биметаллических теплообменных устройств только при классе чистоты обработки контактирующих поверхностей не выше шестого.

Ключевые слова: теплообменные устройства, поверхностная шероховатость, термическое сопротивление, процессы переноса, моделирование, вычислительные шаблоны.

A. A. Andrizhievsky¹, A. G. Lukashevich²

¹Belarusian State Technological University
²Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of NAS of Belarus

ANALYSIS OF INFLUENCE OF PURITY PROCESSING AND CONDITIONS ON HEAT TRANSFER SURFACES COUPLING EFFICIENCY OF HEAT TRANSFER

The study examined the impact of cleanliness processing bimetallic contact heat transfer surfaces on the value of thermal resistance zone of their pairing, and heat transfer characteristics bimetallic heat exchanger devices.

As a result of complex computational experiments obtained a number of new results and, in particular, the dependence of the thermal resistance interface zones heat flow and temperature differences from the purity of contact heat transfer processing surfaces and impact on contact clearance thermal conditions.

Compare the experimental and numerical thermal resistance dependency on temperature difference in the contact area. This comparison is executed for temperatures up to 20°C, in which these dependencies are linear in nature. Noted good agreement of settlement and empirical data on the results of studies done about a marked influence degree of roughness surface.

According to a study done about a marked influence degree of roughness surfaces heat transfer on thermal parameters of bimetallic heat exchanger devices only when class purity processing the contacting surfaces are not above the sixth.

Key words: heat-exchange devices, surface roughness, thermal resistance, transport processes, modeling, computing templates.

Введение. В основу предлагаемого метода анализа многослойных поверхностей теплообмена положена процедура анализа реальной конфигурации промышленных образцов этих поверхностей и использование ее в качестве базовой при

анализе теплогидравлических характеристик предлагаемых к внедрению конструкций.

Одним из ключевых моментов подобного анализа является определение термического сопротивления контактных поверхностей теплообмена.

Данная проблема может быть решена посредством обратных или прямых задач теплообмена на основе многомерных вычислительных аналогов с использованием данных тестовых испытаний промышленных образцов теплообменных поверхностей или прямых определений термических сопротивлений в специализированных экспериментальных исследованиях [1].

Основная часть.

Постановка задачи исследования и метод анализа. В рамках данного исследования рассматривалась проблема влияния чистоты обработки контактирующих поверхностей теплообмена¹ на величину термического сопротивления зоны их сопряжения и, соответственно, на теплообменные характеристики биметаллических теплообменных устройств.

В качестве базовой модели процессов переноса выбрана следующая система уравнений сохранения:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial U}{\partial t} - \nabla \left[\left(\eta + \rho \frac{C_\mu k^2}{\sigma_k \varepsilon} \right) \cdot (\nabla U + (\nabla U)^T) \right] + \\ + \rho U \cdot \nabla U + \nabla P = 0; \\ \nabla \cdot U = 0; \\ \frac{\partial T}{\partial t} + U_j \cdot \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + J_T, \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ – плотность рабочей среды; U – компонента скорости потока; η – ламинарная составляющая коэффициента динамической вязкости; P – гидростатическое давление; T – температура; x – пространственная координата; λ – коэффициент теплопроводности; J_T – объемный тепловой источник; индекс j – проекции на оси координат.

Расчет турбулентной составляющей коэффициента динамической вязкости в (1) выполняется согласно $k - \varepsilon$ модели турбулентности в интерпретации COMSOL Multiphysics 3.5:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial k}{\partial t} - \nabla \left[\left(\eta + \rho \frac{C_\mu k^2}{\sigma_k \varepsilon} \right) \cdot \nabla k \right] + \rho U \cdot \nabla k = \\ = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} (\nabla U + (\nabla U)^T)^2 - \rho \varepsilon; \\ \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \nabla \left[\left(\eta + \rho \frac{C_\mu k^2}{\sigma_\varepsilon \varepsilon} \right) \cdot \nabla \varepsilon \right] + \rho U \cdot \nabla \varepsilon = \\ = \rho C_{\varepsilon 1} C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} (\nabla U + (\nabla U)^T)^2 - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}, \end{aligned} \quad (2)$$

где k – кинетическая энергия турбулентности; ε – диссипация турбулентной энергии; C_μ , σ_k – модельные константы. Значения модельных констант определены на основании экспериментальных данных и находятся в базе данных COMSOL Multiphysics [2].

Постановка задачи исследования и задание исходных данных выполнены для четырех расчетных подобластей:

- область между оребренными трубами (механизм теплопереноса – конвекция, среда – воздух);
- внешняя труба с оребрением (механизм теплопереноса – теплопроводность, среда – алюминий);
- контактная зона между внешней и внутренней трубами (термическое сопротивление);
- внутренняя труба (теплопроводность, сталь).

В качестве геометрического аналога расчетной области рассматривался промышленный образец биметаллической поверхности теплообмена с внешними интенсификаторами [3], который адаптировался к расчетной модели не только по геометрическим параметрам, но и структуре контактирующих поверхностей.

Результаты исследования. В рамках данного исследования рассматривалась проблема влияния чистоты обработки биметаллических контактирующих поверхностей теплообмена на величину термического сопротивления зоны их сопряжения и, соответственно, на теплообменные характеристики биметаллических теплообменных устройств.

Ширина сопряженной области равнялась эквивалентному размеру шероховатости сопряженных поверхностей в соответствии с классом чистоты их обработки.

Основными анализируемыми параметрами являлись вертикальные (по сечению трубчатой поверхности теплообмена с внешним оребрением) профили температур.

Вычислительный шаблон представлял собой элемент многотрубной системы. Вид вычислительного шаблона и область построения профилей температур (тонирующая плоскость) представлены на рис. 1.

Профили температур в зоне сопряжения рассчитывались в рамках вычислительных экспериментов с использованием адаптированного формализованного шаблона программного пакета SCAT-Termo [3].

В качестве численного метода реализации данного вычислительного шаблона использован метод конечных элементов программного пакета COMSOL Multiphysics.

¹ Классы чистоты поверхности (по ГОСТ 2789-59)

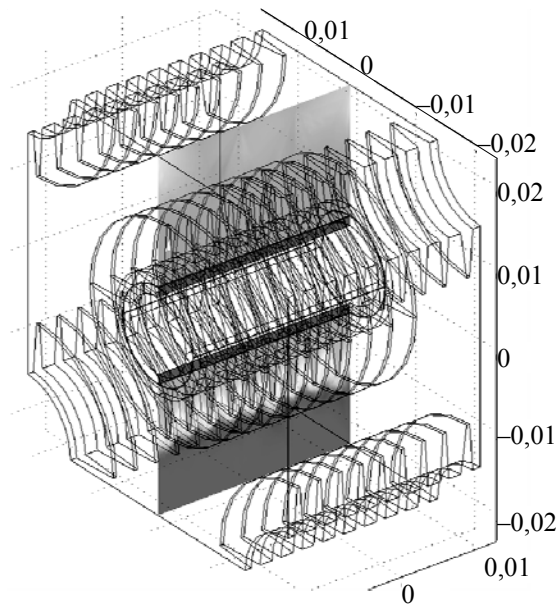
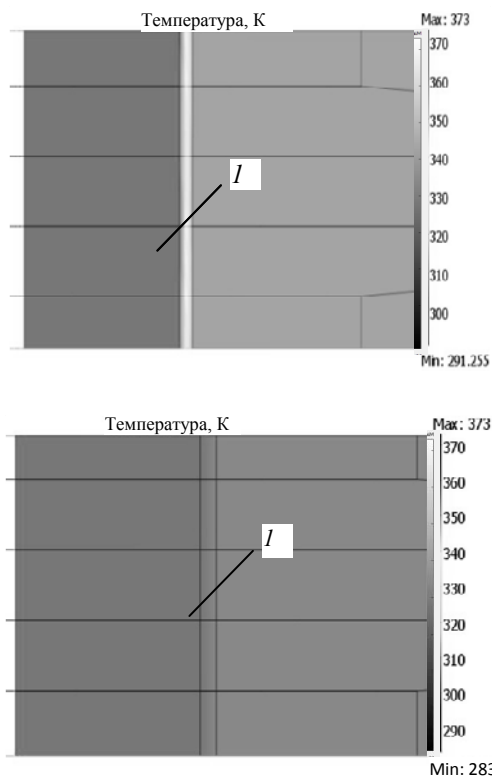


Рис. 1. Расчетный шаблон – область построения профилей температур

На рис. 2 показаны образцы градиентного и графического представления профилей температур в зоне сопряжения биметаллических теплообменных поверхностей.

Как следует из данной иллюстрации, для условий вычислительного эксперимента градиент



температур в зоне сопряжения биметаллических поверхностей теплообмена резко уменьшается с увеличением класса чистоты их обработки. Это, в свою очередь, свидетельствует о снижении термического сопротивления в зоне контакта и соответствующем увеличении теплового потока.

На рис. 3 представлены зависимости термического сопротивления (а) и теплового потока (б) от класса чистоты обработки контактирующих теплообменных поверхностей. Данные зависимости носят асимптотический характер стремления к предельному значению – минимуму для термического сопротивления и максимуму для теплового потока. При этом стремление к предельному значению становится мало заметным при высоких классах чистоты обработки контактирующих поверхностей теплообмена, а именно более 6–7.

В свою очередь данные зависимости отражают уменьшение доли перепада температур в зоне контакта с уменьшением доли термического сопротивления зоны контакта в суммарном термическом сопротивлении теплопередающих поверхностей.

При анализе влияния конструктивных параметров на условия теплообмена в зоне контакта необходимо учитывать и фактор обратного воздействия складывающихся термических условий на линейный размер зоны сопряжения.

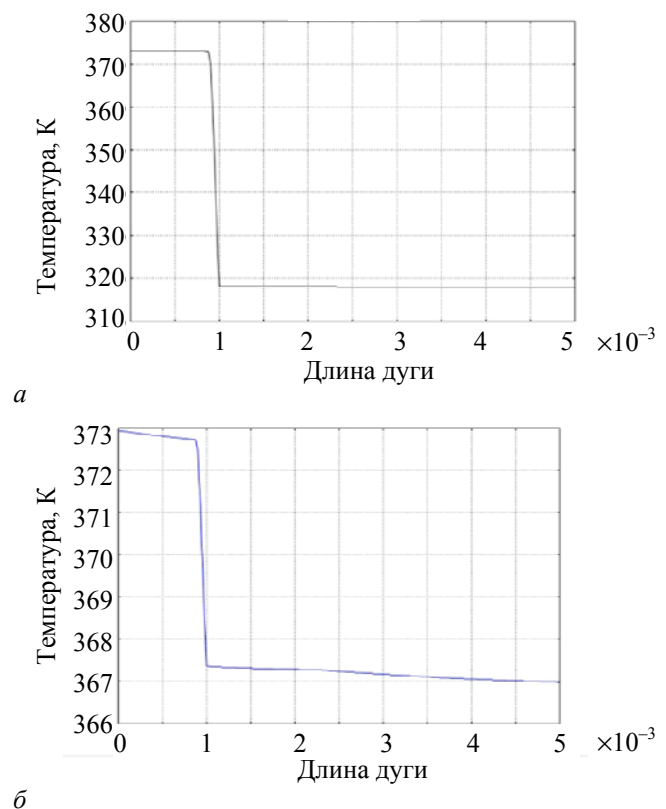


Рис. 2. Градиентное и графическое представление профилей температур в зоне сопряжения биметаллических теплообменных поверхностей (I):

- а – 1-й класс чистоты обработки контактных поверхностей (абсолютная шероховатость ~ 320 мк);
- б – 6-й класс чистоты обработки контактных поверхностей (абсолютная шероховатость ~ 10 мк)

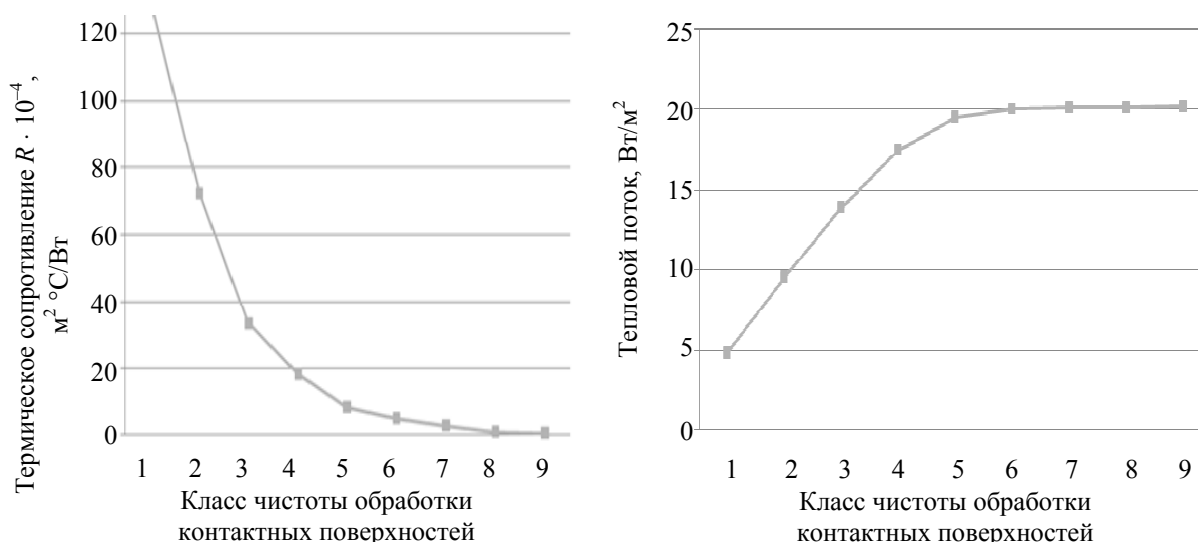


Рис. 3. Зависимость термического сопротивления (а) и теплового потока (б) от класса чистоты обработки (абсолютная шероховатость) контактирующих теплообменных поверхностей:

1 ~ 320 мк; 2 ~ 160 мк; 3 ~ 80 мк; 4 ~ 40 мк; 5 ~ 20 мк; 6 ~ 10 мк; 7 ~ 6,3 мк; 8 ~ 3,2 мк; 9 ~ 1,2 мк

На рис. 4 представлена зависимость термического сопротивления зоны контакта от перепада температур в контакте.



Рис. 4. Зависимость термического сопротивления от перепада температур в контакте

При построении представленной на рис. 4 зависимости учитывалось влияние температур контактирующих поверхностей на термическое расширение зоны контакта вследствие различия их коэффициентов термического расширения. Это дает основание для сравнительного анализа значений термических сопротивлений, полученных экспериментально [4], и в результате вычислительных экспериментов.

Как показали результаты экспериментального исследования, данная зависимость имела линейный характер и описывалась следующим соотношением:

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

где R_k – термическое сопротивление зоны контакта биметаллических поверхностей теплооб-

мена; ΔT_k – перепад температур в контакте. Эта зависимость получена в диапазоне перепада температур до 20°C.

Как видно из рис. 4, в указанном диапазоне изменения перепада температур в зоне контакта, результаты экспериментального исследования и вычислительного эксперимента хорошо согласуются между собой.

Данное совпадение можно рассматривать как подтверждение правомерности использования представленного выше формализованного шаблона, так и достоверности полученных на его основе результатов.

Закключение. В рамках данного исследования рассматривалась задача влияния чистоты обработки биметаллических поверхностей теплообмена на величину термического сопротивления зоны их сопряжения.

В результате проведения комплекса вычислительных экспериментов получен ряд новых результатов и, в частности, зависимости термических сопротивлений зон сопряжения, тепловых потоков и перепадов температур от чистоты обработки контактирующих теплообменных поверхностей и их влияния на контактный зазор термических условий.

Данный фактор связан с различием коэффициентов термического расширения биметаллических поверхностей теплообмена, ограничивающих зону контакта с воздушной прослойкой.

Выполнено сравнение экспериментальных и численных зависимостей термических сопротивлений от перепада температур в зоне контакта. Это сравнение выполнено для перепада температур до 20°C, в котором данные зависимости носят линейный характер. Отмечено хо-

рошее согласие расчетных и опытных данных, что позволяет сделать вывод о правомерности использования адаптированного к условиям проведения вычислительного эксперимента формализованного шаблона описания процессов переноса в биметаллическом теплообменнике с внешним оребрением.

По результатам исследования делается общий вывод о заметном влиянии степени шероховатости поверхностей теплообмена на термические параметры биметаллических теплообменных устройств только при классе чистоты обработки контактирующих поверхностей не выше шестого.

Литература

1. Андрижиевский А. А., Лукашевич А. Г., Вороницкая А. П. Метод экспертного анализа тепло-технических характеристик промышленных образцов многослойных контактных поверхностей теплообмена // Материалы ММФ – 2013. Минск: ИТМО, 2013. Т. 1, ч. 3. – С. 665–669.
2. Андрижиевский А. А., Лукашевич А. Г. 3D компьютерная модель развитой контактной поверхности теплообмена сложной конфигурации // Труды БГТУ. 2014. № 3: Химия и технология неорганических веществ. в-в. С. 94–97.
3. Андрижиевский А. А., Лукашевич А. Г., Трифонов А. Г. Система комплексного анализа технических и термодинамических параметров теплообменных поверхностей сложной конфигурации // Свидетельство № 840 о регистрации компьютерной программы в Национальном центре интеллектуальной собственности Республики Беларусь. Минск, 2015.
4. Андрижиевский А. А., Дударев В. В., Сухоцкий А. Б. Тестирование биметаллических ребристых труб по величине термического сопротивления механического контакта несущей трубы и оребренной оболочки // Труды БГТУ. 2013. № 3: Химия и технология неорганических веществ. в-в. С. 170–175.

References

1. Andrzhievsky A. A., Voronitskaya A. P., Lukashevich A. G. The method of expert analysis of thermal characteristics of multilayer contact heat transfer surfaces. *Materialy MMF – 2013* [Materials of MIF – 2013]. Minsk, ITMO, 2013, vol. 1, part 3, pp. 665–669 (In Russian).
2. Andrzhievsky A. A., Lukashevich A. G. Three-dimensional computer model for developed contact heat exchange surface of complex configuration. *Trudy BGTU* [Proceeding of BSTU], 2014, no. 3: Chemistry and Technology of Inorganic Substances, pp. 94–97 (In Russian).
3. Andrzhievsky A. A., Lukashevich A. G., Trifonov A. G.. System integrated analysis of technical and thermodynamic parameters of heat exchange surfaces of complex configuration. *Svidetelstvo № 840 o registratsii komp'yuternoy programmy v Natsional'nom tsentre intelektual'noy sobstvennosti Respubliki Belarus'* [Certificate no. 840 for registration of a computer program at the National Center intellectual property of the Republic of Belarus]. Minsk, 2015.
4. Andrzhievsky A. A., Dudarev V. V., Sukhotsky A. B. Test of bimetallic finned tubes for thermal resistance of mechanical contact between carrier pipe and finned casing. *Trudy BGTU* [Proceeding of BSTU], 2013, no. 3: Chemistry and Technology of Inorganic Substances, pp. 170–175 (In Russian).

Информация об авторах

Андрижиевский Анатолий Альгертович – доктор технических наук, профессор кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: aaandri@mail.ru

Лукашевич Алексей Геннадьевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией моделирования нелинейных процессов в энергетике. Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси (220109, г. Минск, ул. Академика А. К. Красина, 99, Республика Беларусь). E-mail: lag@sosny.bas-net.by

Information about the authors

Andrzhievsky Anatoly Algertovich – DSc (Engineering), Professor, the Department of Energy Savings, Hydraulics and Heat Engineers. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: aaandri@mail.ru

Lukashevich Alexey Gennadievich – PhD (Engineering), Head of the Laboratory for Modeling of Nonlinear Processes in Power Engineering. Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of NAS of Belarus (99, Akademika A. K. Krasina str., 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lag@sosny.bas-net.by

Поступила 02.04.2019