

УДК 621.5:519.6

## МЕТОДЫ АНАЛИЗА ТЕРМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ В СИСТЕМАХ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

А. А. Андрижиевский<sup>1</sup>, А. Г. Лукашевич<sup>1,2</sup>, А. Г. Трифонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет, г. Минск

<sup>2</sup>Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны,  
г. Минск, Республика Беларусь

В данном исследовании рассматривались два вида термических сопротивлений:

– контактные термические сопротивления зон сопряжения теплообменных поверхностей с преобладанием в них процессов переноса тепла посредством механизма теплопроводности;

– термических сопротивлений ламинарных пограничных слоев, возникающих при взаимодействии одно- и двухфазных потоков с поверхностью теплообмена.

Базовая математическая модель представляла собой систему многомерных нестационарных уравнений сохранения, которая при необходимости дополнялась условиями сопряжения газовой и жидкостных фаз, а также моделью описания процессов поверхностного испарения [1–3]. При проведении вычислительных экспериментов решалась задача на установление. Объектом имитационного моделирования процессов переноса в области сопряжения теплообменных поверхностей являлся биметаллический теплообменный аппарат. При этом рассматривалась проблема влияния чистоты обработки контактирующих поверхностей теплообмена на величину термического сопротивления зоны их сопряжения и, соответственно, на теплообменные характеристики теплообменного устройств в целом.

В результате проведения данной серии вычислительных экспериментов получен ряд новых результатов и, в частности, зависимостей термических сопротивлений зон сопряжения, тепловых потоков и градиентов температур от чистоты обработки контактирующих теплообменных поверхностей и обратное влияние термических условий в зоне сопряжения на ее характерные линейные размеры (рис. 1, 2). При построении представленной на рис. 2 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:

$$R_k = 3.2 \cdot 10^{-5} \Delta T_k,$$

где  $R_k$  – термическое сопротивление зоны контакта биметаллических поверхностей теплообмена;  $\Delta T_k$  – перепад температур в контакте. Эта зависимость получена в диапазоне перепада температур до 20 °С. Как видно из рис. 2, 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 многомерного вычислительного шаблона, так и достоверности полученных на его основе результатов.

По результатам данной серии вычислительных экспериментов делается общий вывод о заметном влиянии степени шероховатости поверхностей теплообмена на термические пара-

метры биметаллических теплообменных устройств только при классе чистоты обработки контактирующих поверхностей не выше шестого.

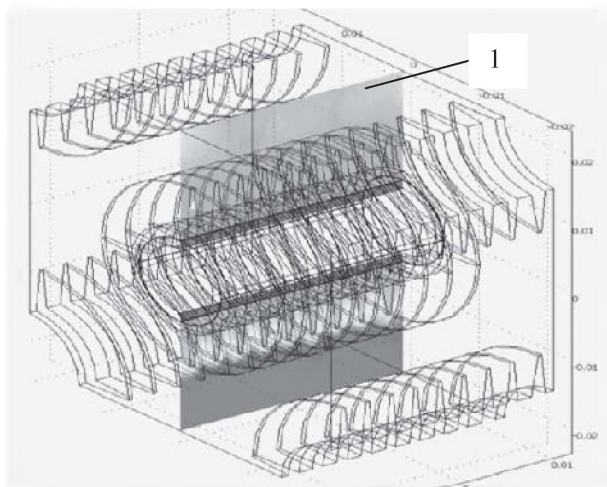


Рис. 1. Расчетный шаблон – область построения профилей температур (1)

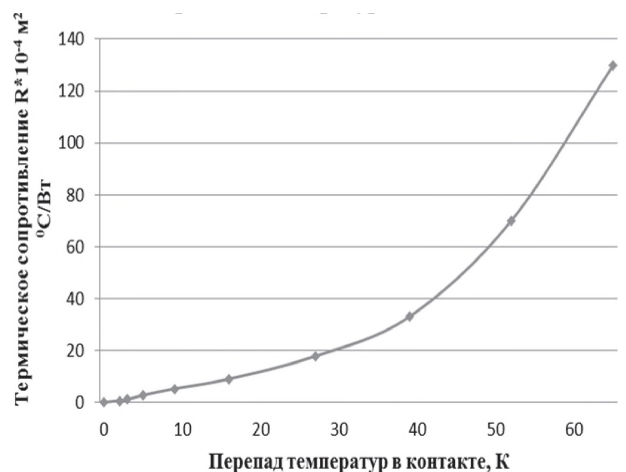


Рис. 2. Зависимость термического сопротивления от перепада температур в контакте

Другая серия вычислительных экспериментов была посвящена сравнительному анализу методов описания пограничных термических сопротивлений ламинарных пограничных слоев в системах с фазовыми превращениями. Объектом имитационного моделирования в данном случае являлся трубный пучок теплообменника-конденсатора охладительного контура с естественной циркуляцией системы аварийного отвода остаточного тепловыделения (СПОТ) АЭС [5]. При проведении вычислительных экспериментов получены характеристики структуры парок капельных потоков в каналах теплообменника-конденсатора СПОТ АЭС и, в частности, динамики образования пленки конденсата на вертикальной поверхности теплообмена при спутном течении пара и пленки конденсата. С целью сокращения числа расчетных ячеек, секции теплообменника-конденсатора представлялись в виде плоских поверхностей. В рамках принятой модели смешения толщина приповерхностной пленки конденсата определяется величиной объемного содержания дисперсной фазы (конденсата). При принятых допущениях можно считать, что пленка конденсата и пограничный слой совпадают. Вместе с тем, принятая выше формализация трубного пучка секции теплообменника-конденсатора в виде плоских поверхностей теплообмена, позволяет использовать предложенную В. Г. Левичем [6] формулу для расчета локальной толщины ламинарного пограничного слоя при обтекании полубесконечной тонкой пластины при относительно малых числах Рейнольдса:

$$\delta^* = 5,2 \cdot \left( \frac{x\nu}{u_\infty} \right)^{0,5},$$

где  $x$  – расстояние от кромки пластины;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости;  $u_\infty$  – скорость невозмущенного набегающего потока.

На рис. 3 представлены профили локальных толщин пограничного слоя  $\delta_x^*$ , рассчитанные на основе многомерного вычислительного шаблона, а также толщин пограничного слоя  $(\delta_{см})_x^*$ , рассчитанные по формуле В. Г. Левича при локальных параметрах смеси. Дополнительно на рис. 3 приведены, рассчитанные при осредненных параметрах смеси с использованием чисел Нуссельта, толщины пограничного слоя для конденсации пара на вертикальных плоских  $\bar{\delta}_{ст}^*$  и трубчатых  $\bar{\delta}_{тр}^*$  поверхностях теплообмена. Видно достаточно хорошее совпадение как характера поведения, так и значений  $\delta_x^*$  и  $(\delta_x^*)_{см}$  вдоль оси теплообменника-

конденсатора. Имеющиеся разногласия в значениях  $\delta_x$  и  $\delta_x^*$  связаны с использованием в данной серии тестовых вычислительных экспериментов осредненной по длине теплообменного канала, скорости конденсации, что приводит к ее занижению и завышению соответственно на начальных и конечных участках теплообменника.

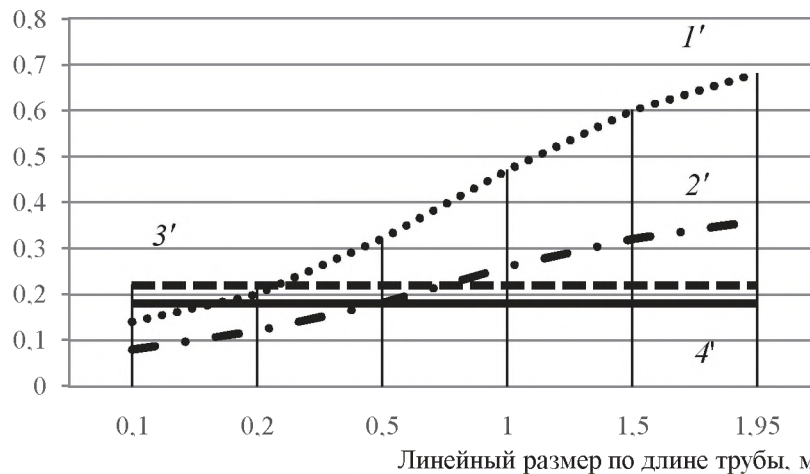


Рис. 3. Сравнительный анализ расчетных профилей пограничного слоя с результатами опытных исследований: 1' –  $\delta_x^*$ ; 2' –  $(\delta_x^*)_{см}$ ; 3' –  $\tilde{\delta}_{см}^*$ ; 4' –  $\tilde{\delta}_{тр}^*$

Вместе с тем авторы считают, что для рассматриваемого случая поверхностного отвода тепловой энергии с образованием пленки конденсата более оправдано использование формулы В. Г. Левича при параметрах дисперсной фазы и скорости набегающего потока на входе в каналы.

## Литература

1. 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.
2. Андрижиевский А. А., Михалевич А. А., Трифонов А. Г. Моделирование термоконвективных течений в динамических газожидкостных слоях водных охладителей // Докл. НАН Беларуси. Технические науки. 1995. Т. 39, № 3. С. 109–113.
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. М.: Наука, 1964. Ч. 1. – 568 с.
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 // Тр. БГТУ. 2013. № 3: Химия и технология неорган. веществ. С. 170–175.
5. Безлепкин В. В. [и др.]. ЛАЭС II: обоснование пассивных систем безопасности РОСЭНЕРГОАТОМ. 2008. № 2. С. 18–23.
6. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959. – 700 с.