

УДК 536.2:519.6

А. А. Андрижиевский, доктор технических наук, профессор (БГТУ);
А. Г. Лукашевич, кандидат технических наук (ГНУ «ОИЭЯИ – Сосны» НАН Беларуси)

3D КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТОЙ КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

В рамках создания методов анализа теплотехнических параметров многослойных контактных поверхностей теплообмена представлен разработанный на основе программного пакета COMSOL Multiphysics 3D вычислительный шаблон применительно к реальной геометрии промышленного биметаллического многотрубного теплообменника. Практическое применение подобных модельных шаблонов позволяет повысить достоверность обобщения результатов испытаний теплообменных устройств и, соответственно, сократить время их внедрения на рынок энергетического оборудования.

The method for the description of transport processes on the basis of the base patterns multifunctional software packages. The proposed method of analysis of thermal parameters of multi-contact heat exchange surfaces is presented based on the developed software package COMSOL Multiphysics computational pattern in relation to the actual geometry of industrial heat-exchange surface of the bimetallic sample. The practical applications of these model templates to improve the reliability of test results generalize heat exchangers and, consequently, reduce the time of their introduction into the market of power equipment.

Введение. На рынке энергетического оборудования Республики Беларусь имеется широкий спектр теплообменных устройств, отличающихся как назначением, так и конфигурацией теплообменных поверхностей и способами их компоновки. Вместе с тем разнообразие форм поверхностей теплообмена требует индивидуальных стендовых испытаний (как производственных, так и аттестационных), что, безусловно, увеличивает их рыночную стоимость и сдерживает обновление модельного ряда.

Одним из способов сокращения производственных издержек и упрощения процедуры продвижения на рынок модельного ряда теплообменных устройств может быть разработка методов расчетного анализа их тепловых и гидродинамических характеристик с использованием образцов теплообменных поверхностей.

Подобные методы позволят значительно сократить весь производственный цикл от проектирования до внедрения на рынке энергетического оборудования Республики Беларусь.

Постановка задачи исследования и метод вычислительного анализа. В рамках данного исследования приняты процедура построения расчетных областей и метод решения базовых систем нестационарных многомерных уравнений сохранения на основе формализованных шаблонов программного пакета *COMSOL Multiphysics* и встроенного в данный пакет метода конечных элементов. При этом расчет турбулентной составляющей коэффициента кинематической вязкости выполнялся согласно *k-ε* модели турбулентности в интерпретации *COMSOL Multiphysics*.

Постановка задачи исследования и задание исходных данных выполнено 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 трубой (термическое сопротивление);

– внутренняя труба (теплопроводность, сталь).

В качестве геометрического аналога расчетной области рассматривался промышленный образец биметаллической поверхности теплообмена с внешними интенсификаторами [1], который адаптировался к расчетной модели не только по геометрическим параметрам, но и по структуре контактирующих поверхностей.

Контактный неоднородный слой моделировался пористой структурой с заданными (в соответствии с электронным прототипом) характеристиками. При решении в рамках вычислительных экспериментов обратной задачи теплообмена использовались экспериментальные градиенты температур в области контакта сопряженных поверхностей теплообмена.

На рис. 1 представлены структура расчетной области и элемент графического интерфейса 3D модели биметаллического трубного пучка с внешним оребрением.

Результаты исследования. В данной работе представлены результаты верификации 3D модели анализа теплотехнических и аэродинамических характеристик развитой контактной

поверхности теплообмена сложной конфигурации применительно к трубному пучку биметаллических труб с внешним оребрением.

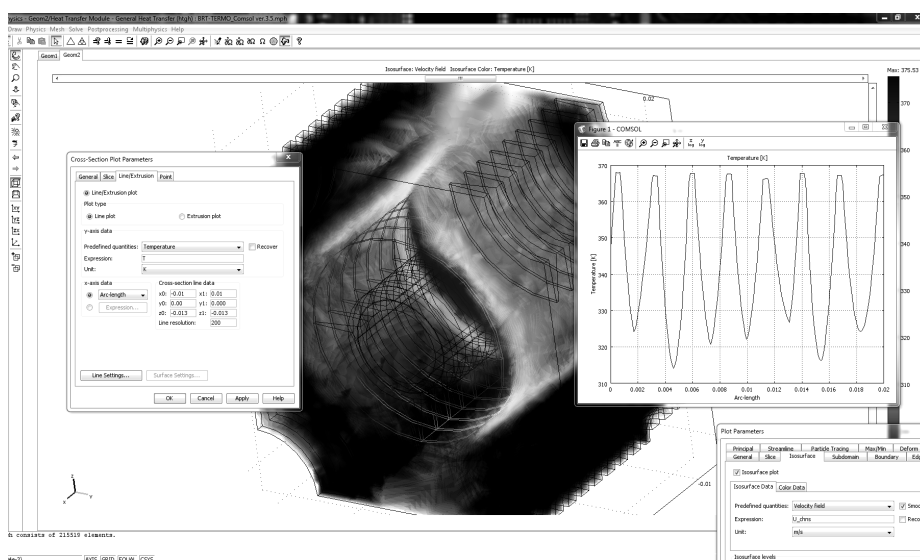
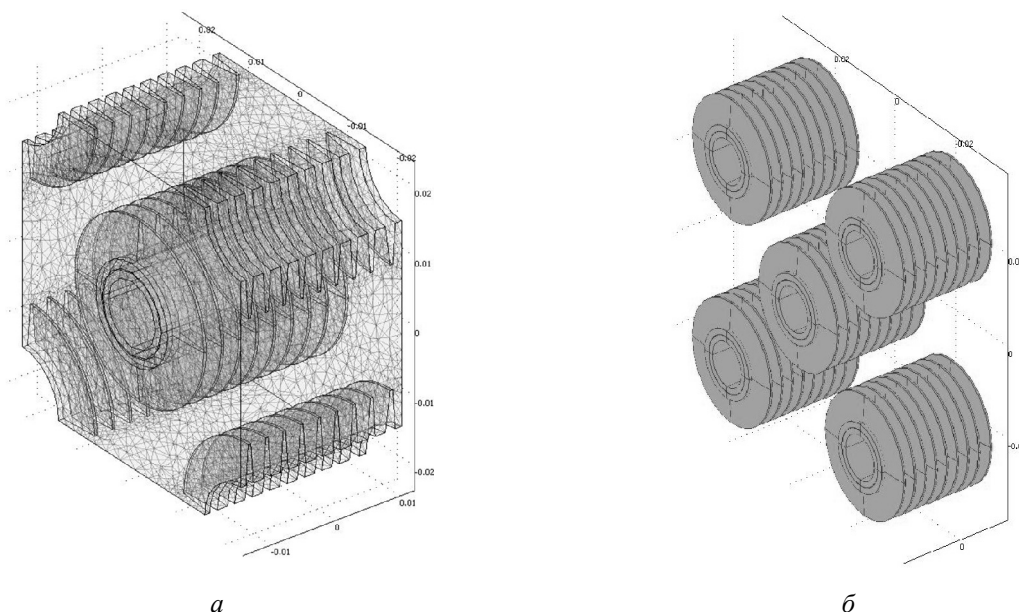
При проведении вычислительных экспериментов рассматривались следующие механизмы переноса:

– теплоперенос посредством естественной конвекцией воздуха в модельном элементе шахматного трубного пучка при граничном условии 1-го рода на оси центральной трубы. Остальные трубы в расчетной области играли роль вытеснителей для соответствия профиля воздушного потока условиям течения в реальном теплообменнике. На их внешней поверх-

ности ставилось условие тепловой изоляции с бесконечно большим термическим сопротивлением;

– теплоперенос посредством естественной конвекцией воздуха в описанном выше модельном элементе шахматного трубного пучка при задании условия симметрии температур внешних поверхностей трубных вытеснителей и центральной трубы;

– теплоперенос комбинированной (вынужденной и естественной) конвекцией воздуха в рассматриваемом модельном элементе шахматного трубного пучка при граничном условии 2-го рода на оси центральной трубы.



6

Рис. 1. 3D модель биметаллического трубного пучка:
 а – трехмерная модель элемента трубного пучка; б – конечно-элементное разбиение расчетной области;
 с – элемент графического интерфейса специализированного вычислительного шаблона
 (геометрические характеристики расчетной области – 0,04×0,02×0,04 м)

Последний из указанных выше режимов соответствовал экспериментальному исследованию термического контактного сопротивления промышленного образца биметаллической трубы с внешним оребрением [1]. Результаты данной работы использованы при валидации расчетной модели в рамках решения обратной задачи теплообмена.

По результатам проведения комплекса вычислительных экспериментов выполнен анализ профилей давлений, скоростей и температур в различных сечениях расчетного шаблона, который выявил ряд особенностей протекания процессов теплопереноса в сопряженных областях сложной конфигурации.

Рис. 2, 3 иллюстрируют, соответственно, в графическом и диаграммном представлении линии тока и поля скоростей в условиях проведения данной серии вычислительных экспериментов.

На рис. 4, 5 представлены диаграммы распределения температур в различных сечениях пространственной расчетной области.

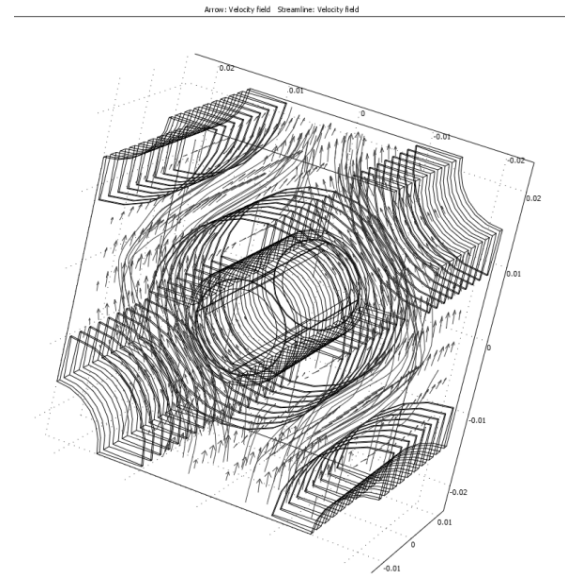
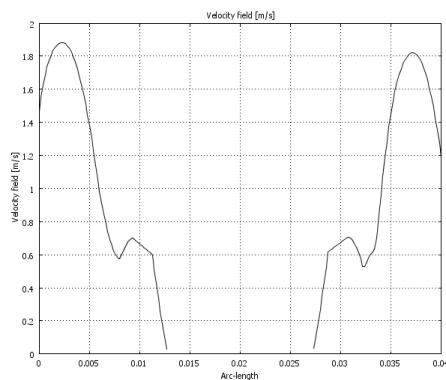
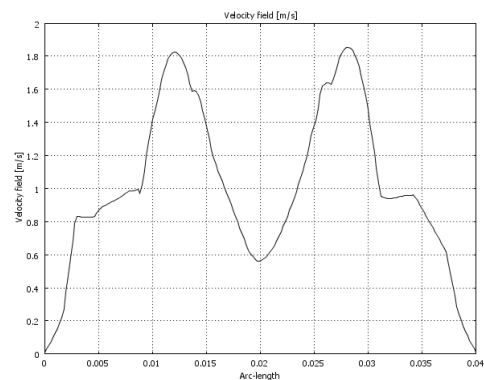


Рис. 2. Линии тока аэродинамического потока (геометрические характеристики расчетной области согласно рис. 1)

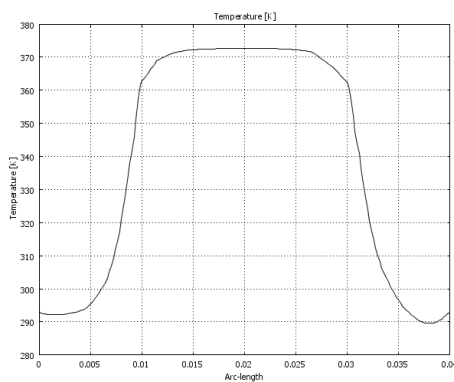


a

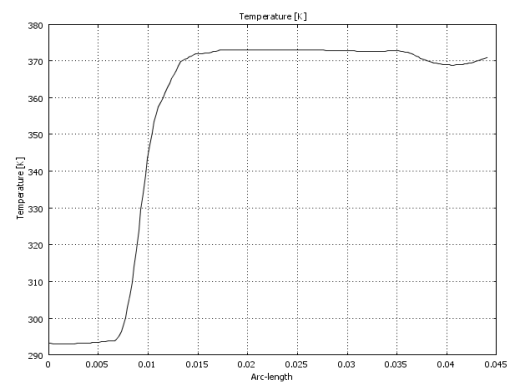


б

Рис. 3. Поля скоростей воздушного потока в различных сечениях расчетной области: *a* – профиль скоростей в центральном сечении; *б* – профиль скоростей во входной области (диапазон изменения скоростей от 0 до 2,2 м/с)



a



б

Рис. 4. Диаграммное представление распределения температур в различных сечениях расчетной области (свободный поток): *a* – профиль температур в воздушном потоке в поперечном сечении; *б* – профиль температур в воздушном потоке в продольном сечении (диапазон изменения от 293 до 372 К)

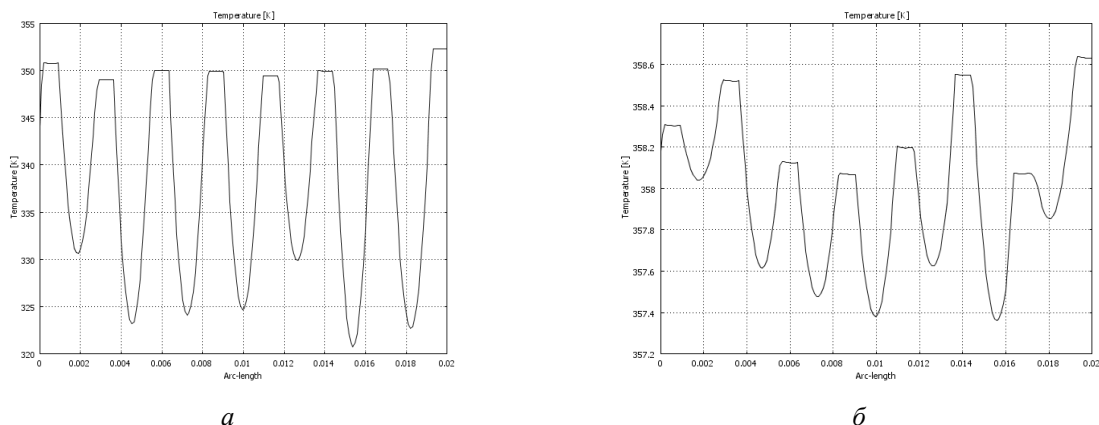


Рис. 5. Профиль температур в зоне оребрения:

a – продольный профиль температур в зоне оребрения снизу (диапазон изменения от 325 до 352 К);
б – продольный профиль температур в зоне оребрения сверху (диапазон изменения от 357,2 до 358,6 К)

Как следует из рис. 4, продольный профиль температур в зоне оребрения по нижней образующей имеет более регулярный, чем соответствующий профиль температур по верхней образующей, характер. Это может быть объяснено, прежде всего, более стабильной, чем на выходе, аэродинамической ситуацией на входе в расчетный аналог элемента трубного пучка. Данная нестабильность связана с образованием вихревых структур и сносом их по потоку к выходу из расчетной области.

С другой стороны, амплитуда изменения температур в массиве ребра и аэродинамическом потоке по нижней образующей выше, что связано с относительно низкой температурой воздушного потока на входе.

Кроме указанных выше характерных особенностей протекания процессов переноса в расчетном шаблоне, из рис. 5 следует, что в кормовой части труб образуются застойные зоны и, соответственно, в этой зоне происходит «провал» профиля температур. Это, в свою очередь, свидетельствует о меньшей тепловой интенсивности поверхности теплообмена в кормовой части труб.

Подтверждением этого вывода, в какой-то степени, может служить представленное на рис. 6 распределение тепловых потоков по расчетной области.

Заключение. В целом, по результатам верификации разработанного 3D вычислительного шаблона применительно к реальной геометрии промышленного биметаллического многотрубного теплообменника, можно сделать вывод о его физической непротиворечивости и согласовании результатов применения с опытными данными в рамках решения обратной задачи теплообмена.

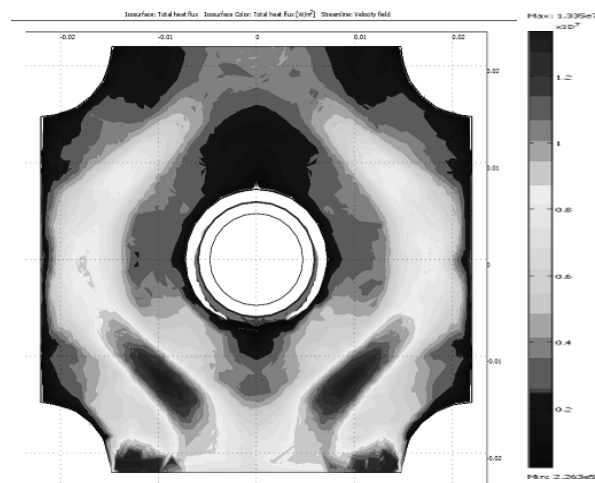


Рис. 6. Распределение тепловых потоков по расчетной области (диапазон изменения от $2,3 \cdot 10^5$ до $1,3 \cdot 10^7$ Вт/м², скорость воздушного потока на входе – 6 м/с)

Практическое использование подобных вычислительных шаблонов позволит повысить достоверность интегральных методов обобщения результатов испытаний промышленных теплообменных устройств и тем самым сократить затраты и время их внедрения на рынок энергетического оборудования.

Литература

1. 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 неорган. в-в. С. 166–169.

Поступила 05.03.2014