

УДК 621.184.6:66.021.3

А. А. Андрижиевский, доктор технических наук, профессор (БГТУ);
А. П. Вороницкая, аспирант (БГТУ); **А. Г. Лукашевич**, кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник (ГНУ «ОИЭЯИ – Сосны» НАН Беларуси)

РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО АНАЛОГА БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА

Рассмотрены методы описания процессов переноса на основе базовых шаблонов многофункциональных программных пакетов. В рамках предлагаемого метода анализа теплотехнических параметров многослойных контактных поверхностей теплообмена представлен разработанный на основе программного пакета COMSOL Multiphysics вычислительный шаблон применительно к реальной геометрии теплообменной поверхности промышленного биметаллического образца. Практическое использование 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. Одним из способов снижения 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 позволяют значительно сократить весь производственный цикл от проектирования до внедрения.

Постановка задачи. В основу предлагаемого 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 решена при помощи 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.

В настоящее время разработан ряд программных пакетов функционального назначения применительно к 2-D и 3-D моделированию

процессов переноса в каналах сложной формы. Например, LS-DYNA (Livermore Software Technologies Corp.- DYNAMIC) [1], ANSYS+CFX (Computational Fluid dynamIX) [2], FlowVision [3], Star-CD (Computational Dynamics) [4], COMSOL Multiphysics [5].

Наиболее используемыми в настоящее время являются многофункциональные программные пакеты ANSYS и COMSOL Multiphysics, в основе которых лежит численный метод конечных элементов. Оба пакета позволяют решать широкий класс задач, в них заложены модули для решения различных связанных проблем, например, в областях электродинамики, гидродинамики, термомеханики и т. п.

Основное отличие ANSYS и COMSOL Multiphysics заключается в их концепции. В COMSOL Multiphysics всегда при использовании любого модуля пользователю доступны и уравнения, описывающие процесс, и краевые условия в явном виде. В ANSYS, напротив, математическая постановка скрыта от пользователя за выбором элемента. В ANSYS выбор элемента означает выбор уравнений, описывающих процесс, т. е. круг возможных постановок решаемых задач сужается. Кроме того, COMSOL Multiphysics содержит различные решатели, которые помогут быстро справиться даже с самыми сложными задачами, а простая структура приложения обеспечивает простоту и гибкость использования.

Метод расчета. Исходя из вышеизложенного, в качестве базовой среды построения вычислительных аналогов выбирается формализованная структура и вычислительный метод программного пакета COMSOL Multiphysics.

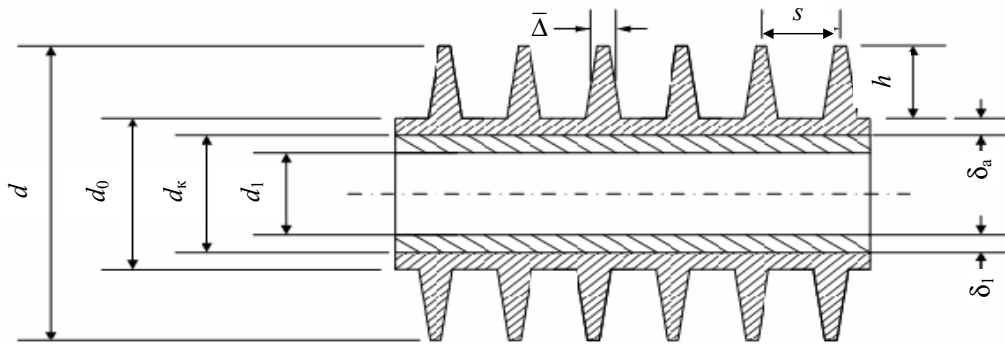


Рис. 1. Схема моделируемого образца:

$d = 26$ мм; $d_0 = 14,5$ мм; $d_k = 12$ мм; $d_1 = 9,5$ мм; $h = 5,75$ мм; $s = 2,7$ мм; $\Delta = 0,33$ мм; $\delta_1 = 1,25$ мм; $\delta_a = 1,25$ мм

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

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} - \nabla \left[\left(\eta + \rho \frac{C_\mu k^2}{\sigma_k \varepsilon} \right) (\nabla U + (\nabla U)^T) \right] + \rho U \nabla U + \nabla P = 0;$$

$$\nabla U = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial t} + U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + J_T,$$

где ρ – плотность рабочей среды; U – компонента скорости потока; x – пространственная координата; P – гидростатическое давление; λ – коэффициент теплопроводности; J_T – объемный тепловой источник. Индекс j – проекции на оси координат.

Расчет турбулентной составляющей коэффициента кинематической вязкости выполняется согласно k - ε -модели турбулентности в интерпретации COMSOL Multiphysics:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} - \nabla \left[\left(\eta + \rho \frac{C_\mu k^2}{\sigma_k \varepsilon} \right) \nabla k \right] + \rho U \nabla k =$$

$$= \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} (\nabla U + (\nabla U)^T)^2 - \rho \varepsilon,$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \nabla \left[\left(\eta + \rho \frac{C_\mu k^2}{\sigma_\varepsilon \varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \rho U \nabla \varepsilon =$$

$$= \rho C_{\varepsilon 1} C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} (\nabla U + (\nabla U)^T)^2 - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k},$$

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.

В представленной работе приведены результаты верификации (в рамках отмеченного выше метода) пространственной вычисли-

тельной модели описания процессов теплопередачи через биметаллическую контактную поверхность теплообмена опытного образца (рис. 1).

На рис. 2, 3 представлен электронный прототип контактной поверхности рассматриваемого образца. Как видно из рис. 4, б, контактная поверхность имеет сложную структуру с взаимными проникновениями отдельных слоев и воздушными прослойками.



Рис. 2. Образец промышленной теплообменной поверхности

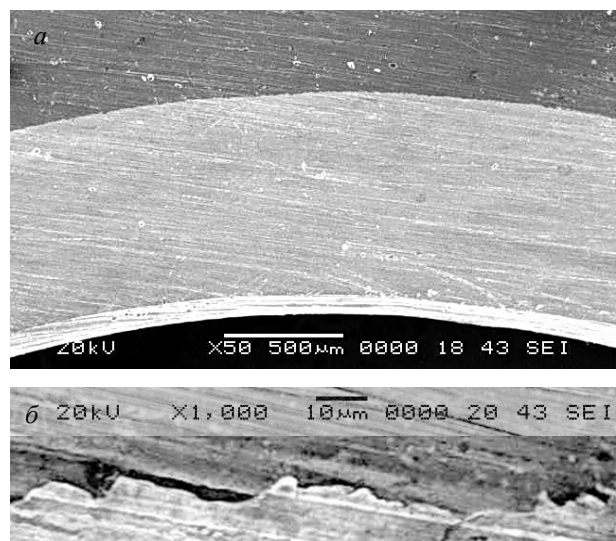


Рис. 3. Электронный прототип контактной поверхности при различных увеличениях: а – в 50 раз; б – в 1000 раз

В соответствии с параметрами экспериментального участка по изучению теплотехнических показателей промышленного образца биметаллической поверхности теплообмена разработаны геометрические и модельные вычислительные шаблоны применительно к пространственной постановке задач тепломассопереноса (рис. 4).

Данные вычислительные шаблоны включают многослойную контактную поверхность теплообмена, состоящую из внутренней стальной трубы, области контактного термического сопротивления и внешней алюминиевой трубы с оребрением (рис. 4, а). Контактный неоднород-

ный слой моделировался пористой структурой с заданными (в соответствии с электронным прототипом) характеристиками.

Практическая реализация вычислительных шаблонов методом конечных элементов предполагает разбиение расчетной области на конечные элементы различного размера и различной конфигурации. Пример принятой в рамках верификации программного продукта конечно-элементной сетки представлен на рис. 4, б (осесимметричная задача).

На рис. 5 приведены примеры элементов интерфейса и графического представления результатов вычислительного эксперимента.

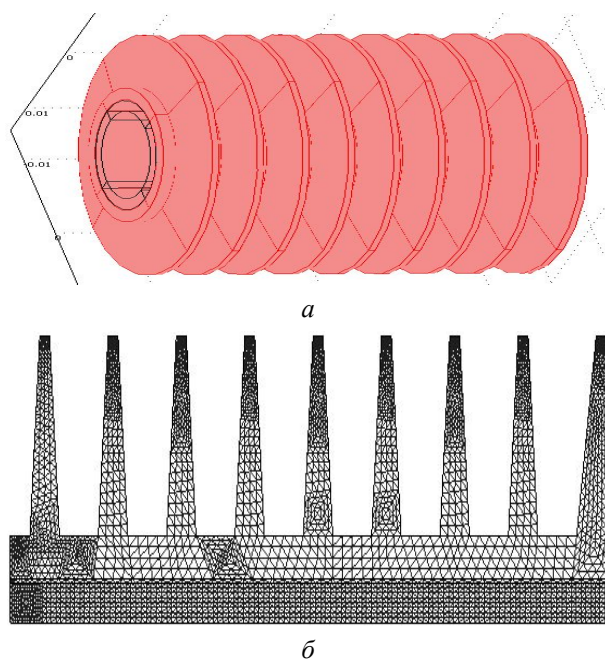
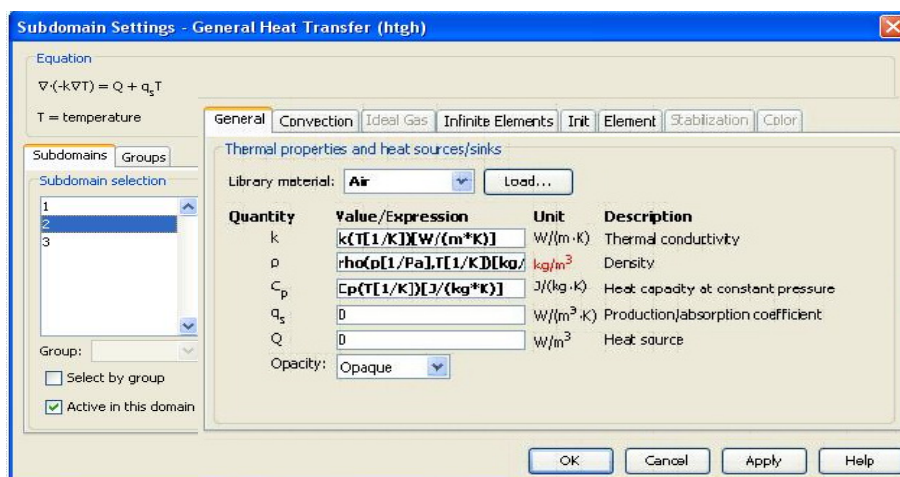


Рис. 4. Элементы модельного расчетного шаблона многослойной контактной поверхности теплообмена с оребрением:
а – трехмерная модель биметаллической трубы;
б – конечно-элементное разбиение расчетной области



а

Рис. 5. Элементы интерфейса расчетного шаблона многослойной контактной поверхности теплообмена:
а – элемент интерфейса пользователя для задания исходных данных (окончание см. на с. 153)

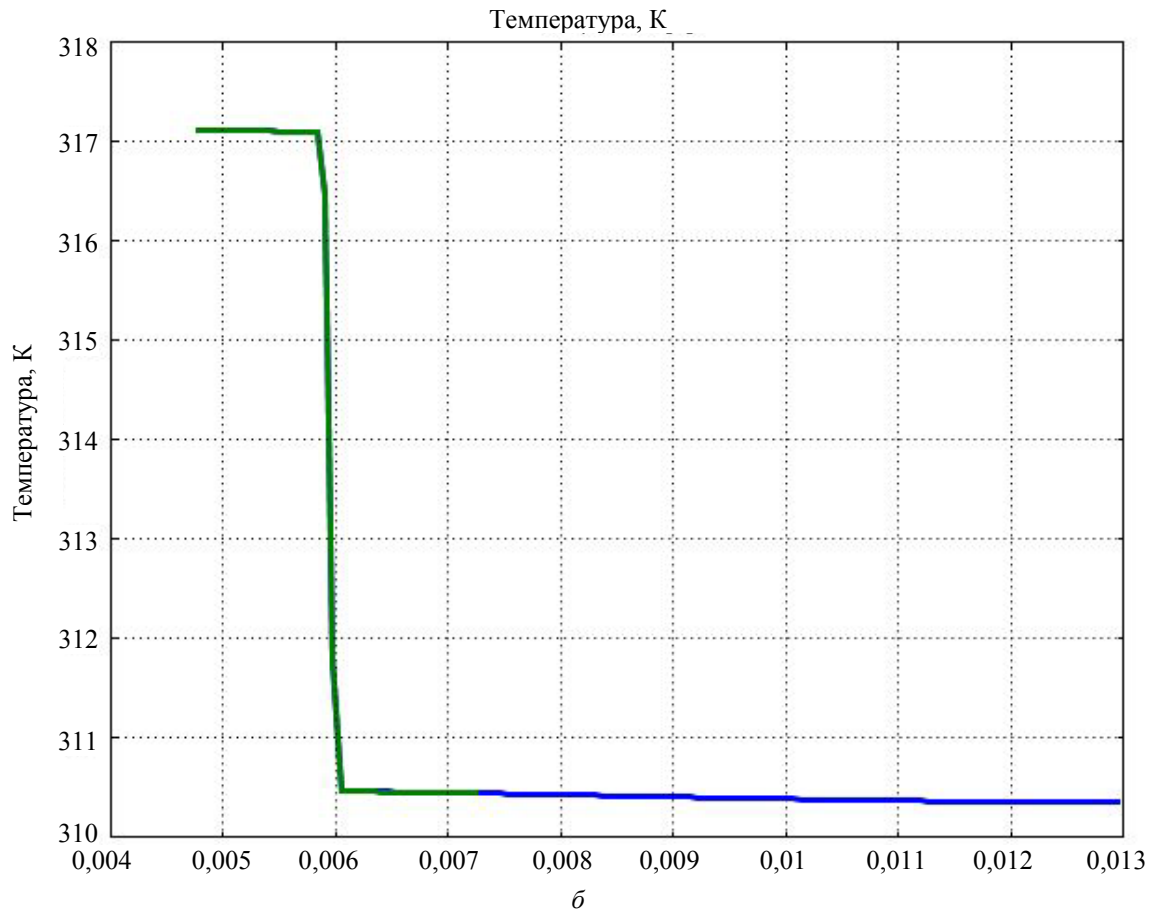


Рис. 5. Окончание (начало см. на с. 152):

\bar{b} – пример графического представления результатов распределения температуры в поперечном сечении (по центру ребра) модельного образца

Численное решение поставленной задачи проводилось применительно к несимметричной задаче теплообмена.

В последующем, в рамках решения обратной задачи теплообмена, результаты вычислительного эксперимента согласуются с результатами экспериментального исследования на натурной модели биметаллической поверхности теплообмена.

Заключение. Как следует из результатов данного исследования, применение представленного вычислительного шаблона биметаллической контактной поверхности теплообмена промышленного образца показывает его физическую непротиворечивость и устойчивость при задании граничных условий различного рода.

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

Литература

1. Пакет LS-DYNA. Обзор программы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lsdyna.com>. – Дата доступа: 11.12.2011.
2. Центр поддержки продуктов ANSYS в России и СНГ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ansys-expert.ru/product/ansys-cfx>. – Дата доступа: 21.01.2012.
3. Центр поддержки FlowVision в России и странах СНГ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.flowvision.ru>. – Дата доступа: 15.01.2012.
4. Пакет STAR-CD. Обзор программы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.procae.ru/articles/star-cd/76-about-star-cd.html>. – Дата доступа: 21.12.2011.
5. Моделирование с COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.humusoft.com/produkty/comsol/ru>. – Дата доступа: 10.12.2011.

Поступила 02.03.2012